



Institut français de recherche scientifique
pour le développement en coopération

STATION DE RECHERCHES
SUR LE PALMIER À HUILE
(S R P H) POBÉ (BÉNIN)



**Centre
de
Montpellier**

MATIÈRE ORGANIQUE ET AZOTE
DANS LES SOLS CULTIVÉS
SUR TERRES DE BARRE (BÉNIN)

Narcisse DJEGUI

Laboratoire de comportement des sols cultivés

Document ORSTOM Montpellier, 1992, n° 6

N. DJEGUI

**MATIERE ORGANIQUE ET AZOTE
DANS LES SOLS CULTIVES SUR
TERRES DE BARRE (BENIN)**



10 NOV. 1992

Station de Recherches sur le Palmier à Huile (Pobé, BENIN)
CIRAD (IRAT-IRHO) Montpellier
Centre ORSTOM de Montpellier

F 35901

Les opinions exprimées dans ce document
n'engagent que la responsabilité de son auteur

Ce travail de Recherche a été réalisé dans le cadre de la Station de Recherches sur le Palmier à Huile de Pobé au Bénin, du Laboratoire de Comportement des Sols Cultivés du Centre ORSTOM de Montpellier, et des Laboratoires du CIRAD-Montpellier (IRAT et IRHO), sous la Direction de Mr le Pr. L. ANDRE (ENSAT) et de P. de BOISSEZON (ORSTOM) pour l'obtention, par l'auteur, du titre de Docteur de :

L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE de TOULOUSE
Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie
(ENSAT)

La soutenance a eu lieu à Toulouse le 30 juin 1992

AVANT-PROPOS

Avant d'exposer les résultats et les conclusions de mes travaux, il m'est agréable de remercier toutes les personnes qui, par leur soutien moral, leurs enseignements, leurs conseils ou leur collaboration ont facilité l'élaboration du programme de recherche et son exécution, d'une part, sur le terrain au Bénin et, d'autre part, dans les laboratoires de Toulouse et de Montpellier.

Ma gratitude s'adresse d'abord aux Directeurs de la Recherche Agronomique au Bénin et aux Chefs de la Mission Française de Coopération et d'Action Culturelle qui, par la bourse qu'ils m'ont accordée, ont permis la réalisation de ce travail de thèse.

Pendant toute la période de préparation, d'exécution et de rédaction de mes travaux, Monsieur Louis ANDRE, Professeur à l'Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie de Toulouse a fait preuve d'une constante disponibilité et s'est souvent préoccupé des conditions d'évolution de mes activités. Son soutien moral constant, le chaleureux accueil qu'il m'a toujours réservé, la confiance qu'il m'a témoignée, et les conseils qu'il m'a prodigués, m'ont permis de réaliser dans de bonnes conditions ce travail. Il m'a fait l'honneur de présider le jury qui va juger cette thèse. Je lui exprime ici toute ma profonde gratitude.

Ma très grande reconnaissance va également à Monsieur Paul de BOISSEZON, Directeur de Recherches à l'ORSTOM, qui m'a suivi de très près durant toute la période de ma thèse. Il m'a souvent orienté avec bienveillance et a aiguisé mes réflexions sur le monde complexe de la "dynamique de l'azote dans les sols tropicaux". Ses conseils et ses critiques ne m'ont pas été utiles seulement pour la conduite de mes travaux et la rédaction de ce mémoire; ils le seront pendant toute ma carrière.

J'associe à mes remerciements MM Jean René BAILLY, Professeur à l'Université de Perpignan et Jean Claude REVEL, Professeur à l'Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie qui ont accepté de juger ce mémoire.

Je reste également très sensible à l'intérêt que Mr Christian FELLER a accordé à l'interprétation des résultats et à la rédaction de ce mémoire. La pertinence de ses remarques et son exigence dans la clarté de la présentation et des discussions des résultats, mais aussi la convivialité dont il a fait preuve, m'ont beaucoup aidé durant les dernières phases de son élaboration.

J'ai appris auprès de Mr Jean Claude TALINEAU, la rigueur dans la préparation des expérimentations agro-pédologiques, dans leur conduite et leur interprétation agronomique. Mr Philippe de BLIC m'a initié aux techniques de description des profils culturaux et de l'étude micromorphologique des sols. Je les remercie.

Je remercie également Mr R. MOREAU, Responsable de l'UR 3D de l'ORSTOM qui m'a accueilli dans le Laboratoire des Sols Cultivés du Centre de Montpellier et MM. J.F. VIZIER et E. ROOSE pour leurs différentes suggestions au cours des exposés pour présenter les résultats obtenus.

J'exprime toute ma reconnaissance à tout le personnel de l'IRHO, particulièrement à Mr C. DANIEL qui m'a fait bénéficier de ses connaissances sur le palmier à huile et de son expérience sur les recherches agronomiques réalisées au Bénin et à MM. OCHS et OLIVIN qui ont suivi avec intérêt mon travail.

J'associe à ce travail Mme Evelyne GAVINELLI, qui m'a appris les principales techniques analytiques pour l'étude des matières organiques des sols, Mr Joël FARDOUX qui m'a beaucoup aidé pour l'étude de la minéralisation de l'azote, Mme Christine LARRE-LARROUY pour le soutien qu'elle m'a apporté au cours des travaux que j'ai effectués en serre et Mr Jean Claude MARCOUREL pour le soin qu'il a porté à ranger et préparer les échantillons de sol.

Je remercie les chercheurs et techniciens de l'IRAT (Montpellier) et de l'ORSTOM (Lomé), en particulier Mr Charles EGOUMENIDES qui m'a initié au fractionnement chimique des formes de l'azote organique des sols, MM. GANRY, OLIVER, HANRION et MARLY, qui m'ont accueilli dans leurs laboratoires, Mr J.L. MARGER pour avoir accepté d'effectuer avec beaucoup de soins des contrôles sur les analyses de fractionnement chimique des composés azotés.

Depuis mes premières années à la Direction de la Recherche Agronomique, Mr Jean PICHOT a su avec tact orienter mes premiers pas de chercheur. Il s'est par la suite intéressé à ma carrière scientifique. Les circonstances ont voulu que l'initiative prise très tôt de renforcer mes capacités de recherche à travers une formation doctorale ne se concrétise que plus d'une dizaine d'années plus tard. Cela n'a été possible qu'avec son soutien, mais aussi avec l'aide de MM. Guy CATRIX (FORMAGRO) et Marc ROESCH (Service Formation du CIRAD) d'une part, Mlles EYMART et DEMAISON d'autre part dans le suivi de mon dossier.

Je ne saurais passer sous silence, mais voudrais laisser dans l'anonymat, tous ceux qui, au Bénin et ailleurs en Afrique, parents et amis, ont su me motiver à travers leurs conseils et apporter leur soutien efficace et chaleureux à ma famille dans des moments délicats.

Je remercie plus particulièrement Mr Moïse HOUSSOU, ancien Directeur de la Station de Recherches sur le Palmier à Huile de Pobè (Bénin), qui a permis et favorisé mon séjour de longue durée en France pour achever ce travail de thèse, malgré les contraintes et le surcroît de travail que cela imposait au personnel d'encadrement de la station.

J'exprime ma gratitude à mes collègues et à tout le personnel de la Station de Recherches sur le Palmier à Huile de Pobè pour l'aide et toutes les facilités qu'ils m'ont accordées dans l'accomplissement de ce travail.

Je quitte avec regret mes amis, compagnons et collègues des laboratoires de l'ORSTOM et du CIRAD : Jean de Dieu (avec qui c'était toujours un plaisir d'aller prendre le café à la Cité Internationale), Bernard, Claire, Mathurin, Fujo, José, Marc, Béa, Flaubert, Cyrille, Valérie, Komi, Fouad, etc ..

La dactylographie a été revue avec soins par Suzanne et Marie-Jo, je les remercie.

J'exprime ma reconnaissance à Mme GIOVANINI et à Germaine pour l'accueil qu'elles m'ont toujours réservé lors de mes passages à l'ENSAT.

Je voudrais dire merci enfin à tous ceux qui, à Montpellier et ailleurs, ont su rendre utile et agréable mon séjour en France.

cultures successives ou associées sont : le maïs, le manioc, l'arachide et le niébé. Chaque année, les billons sont refaits sur l'interbillon de l'année précédente et les champs ne sont abandonnés à la friche que durant quelques années lorsqu'ils sont complètement épuisés.

Ces systèmes, constitués d'une culture vivrière pratiquement continue et de plantations pérennes de palmier à huile, ont modifié complètement le paysage agricole. Le fonctionnement et le bilan organique équilibré des écosystèmes fondés sur la jachère forestière ont été modifiés suite à leur substitution par des agrosystèmes dans lesquels le cycle des éléments fertilisants, dans la végétation et dans les sols, comporte notamment des exportations par les récoltes et des pertes par lixiviation qui ne sont généralement pas compensées par les apports d'engrais. Ceci entraîne une baisse des teneurs en éléments minéraux et parfois même une nette acidification des sols qui influe sur le cycle de l'azote comme l'a souligné DABIN (1956) sur les terres de barre du Togo. Même dans les plantations de cultures pérennes, les engrais n'ont été apportés que parcimonieusement et ne compensent pas les exportations par les régimes. Par ailleurs, la diminution de la litière qui tombe au sol ou de la quantité de résidus de cultures ainsi que l'accroissement de la fréquence et de l'intensité du travail du sol et l'absence de couverture végétale pendant de longues périodes ont provoqué une réduction des teneurs en matières organiques des sols cultivés et corrélativement une dégradation de l'agrégation des horizons humifères assez sableux de ces sols. Leur structure devient particulière tandis que s'accroît la compacité des horizons de pénétration humifère (QUENCEZ, 1988).

Cette dégradation de la structure et de la fertilité chimique de ces sols est généralement attribuée par les agronomes à la baisse des teneurs en matières organiques, mais aucune étude systématique n'a été consacrée à l'influence des différents systèmes de cultures pratiqués dans cette région sur l'évolution quantitative et qualitative des stocks organiques dans ces sols ferrallitiques .

Les études réalisées dans d'autres pays à environnement semblable ont montré qu'à l'influence des systèmes de cultures sur l'évolution dans le temps des stocks de matières organiques, s'ajoute l'impact de nombreux facteurs édaphiques et pédoclimatiques qui interfèrent avec les pratiques culturales dans les écosystèmes agricoles (LAL et KANG, 1982).

Parmi les facteurs édaphiques qui interviennent dans cette évolution, nous retiendrons principalement la texture (de BOISSEZON, 1973; FELLER et al., 1991b), le pH et la ré-

L'étude concerne les sols ferrallitiques du Sud - Bénin nommés habituellement "terres de barre". Elle vise à déterminer l'effet de différents systèmes de cultures sur le statut organique de ces sols et en particulier le statut azoté. Traditionnellement, le système de culture pratiqué au Sud du Bénin sur les terres de barre s'apparentait à une exploitation agricole itinérante, commune à la zone de forêt dense humide bordant le Golfe de Guinée. Après abattage et brûlis du sous-bois et de la plupart des arbres, les cultures, fertilisées avec les cendres, étaient réalisées avec un travail très limité du sol (semis en poquet). Toutefois, les palmiers à huile étaient respectés et recevaient un minimum d'entretien en vue de la cueillette des régimes de noix de palme ou de la saignée pour le vin de palme. La période de culture de quelques années était suivie d'une longue jachère forestière d'une durée d'au moins dix années, qui permettait une certaine régénération de la fertilité des sols.

L'accroissement de la population dans la bordure côtière et le passage d'une économie d'autosubsistance à une économie de marché avec le développement des cultures de rente et des plantations pérennes ont modifié progressivement l'équilibre dynamique de ce système de culture traditionnel. Des plantations, en particulier de palmier à huile, ont été créées en adaptant le matériel végétal et les techniques culturales à un régime climatique marqué par une pluviosité annuelle à peine suffisante pour un bon développement des palmiers. En particulier, afin de minimiser la concurrence hydrique des plantes de couverture classiquement implantée dans les interlignes au cours des premières années qui suivent la plantation ou la replantation, on s'est rendu compte que le maintien d'un sol nu provoquait un meilleur développement végétatif et une production de régimes plus importante du palmier à huile au jeune âge (BENARD et DANIEL, 1971; DANIEL et de TAFFIN, 1974).

La réduction des surfaces disponibles pour les cultures vivrières et leur morcellement ont entraîné une modification du type de jachère et une réduction progressive de leur durée. La jachère forestière qui se développait dans les friches a laissé partiellement la place à des graminées et le recrû forestier a été remplacé par une savane arbustive. Par ailleurs, le travail du sol à la houe était plus conséquent avec l'édification de billons.

A l'heure actuelle, l'exploitation dominante en cultures annuelles ou bisannuelles s'identifie à un système de cultures vivrières avec billons dans lesquels sont enfouis les adventices et les résidus de cultures. Les principales espèces cultivées conduites en

serve minérale (ALLISON, 1973). Ces caractéristiques du sol conditionnent le type d'humus, la nature, l'importance et la stabilité des complexes organo - minéraux ainsi que l'organisation, (agrégation et porosité) des horizons humifères (HUMBE *et al.*, 1977).

Le pédoclimat (température et humidité), fonction du climat atmosphérique et de la couverture du sol, conditionne la production, et donc, la possibilité d'apports plus ou moins importants de matières végétales, ainsi que la vitesse d'évolution des résidus végétaux et des matières organiques du sol (SANCHEZ *et al.*, 1982). Le pédoclimat dépend aussi de l'intensité de la pente et de la position topographique qui interfèrent sur le drainage interne et externe des sols, sur le bilan hydrique tout au long des versants et le transfert des matières organiques dans les profils par lessivage vertical ou oblique et dans les séquences des sols par le jeu du couple érosion-sédimentation.

Pour étudier l'influence des cultures annuelles ou pérennes sur le stock organique des sols du Sud-Bénin, nous avons donc essayé de minimiser les interactions avec les facteurs édaphiques et pédoclimatiques. Les parcelles étudiées ont été choisies sur des sols analogues, en position topographique identique, avec seulement des différences limitées du profil textural, du climat et du passé cultural ancien. Les agrosystèmes qui ont été comparés constituent néanmoins un échantillonnage assez représentatif des situations agricoles les plus courantes de ces plateaux de faible altitude sur terres de barre qui représentent plus de 60 % des terres de cultures dans la partie sud du Bénin d'après les estimations faites par VOLKOFF (1976).

Par ailleurs, la baisse des teneurs en matière organique correspond à une baisse également importante des teneurs en azote dans les sols cultivés. L'apport de fumiers riches en azote (parcelles de cultures vivrières) et/ou d'engrais minéraux azotés procure généralement un accroissement sensible de la production de maïs (WERTZ, 1979) et améliore la nutrition azotée du palmier à huile. Il importe donc de connaître l'influence des systèmes de culture étudiés sur le devenir (niveau et dynamique) des stocks d'azote du sol. Une caractérisation des différentes formes d'azote organique paraît donc nécessaire pour tenter d'évaluer et de localiser la baisse de disponibilité de l'azote dans ces sols sur terres de barre afin de préconiser des techniques culturales qui permettraient d'assurer une alimentation azotée correcte des cultures et une gestion durable du capital azoté de ces sols.

Le plan de notre étude sera donc le suivant:

Dans la première partie, nous présenterons les situations agropédologiques étudiées en mettant l'accent sur la conséquence des façons culturales sur les propriétés générales des sols.

Dans la deuxième partie, nous étudierons plus particulièrement l'effet de différents systèmes de cultures (plantations forestières, palmiers à huile et cultures vivrières) sur la variabilité intra et interparcellaire des stocks organiques des sols.

Dans la troisième partie, nous étudierons l'influence des systèmes de cultures sur les différentes formes de l'azote et sur leur dynamique. Pour cela, nous utiliserons trois approches :

- "biologique": minéralisation de l'azote et sa disponibilité pour la plante,
- "chimique": formes de l'azote obtenues par hydrolyse acide et hydrolyse en milieu alcalin,
- "physique" ou "granulométrique": azote organique associé aux fractions granulométriques du sol.

Nous concluerons par une synthèse générale de ces résultats en vue d'expliquer l'évolution de la fertilité azotée des sols cultivés sur terres de barre et d'en tirer quelques principes pour une gestion durable et/ou une réhabilitation de ces terres.

CHAPITRE I

LE MILIEU PHYSIQUE ET HUMAIN DANS LE SUD DU BENIN

1. LE CLIMAT

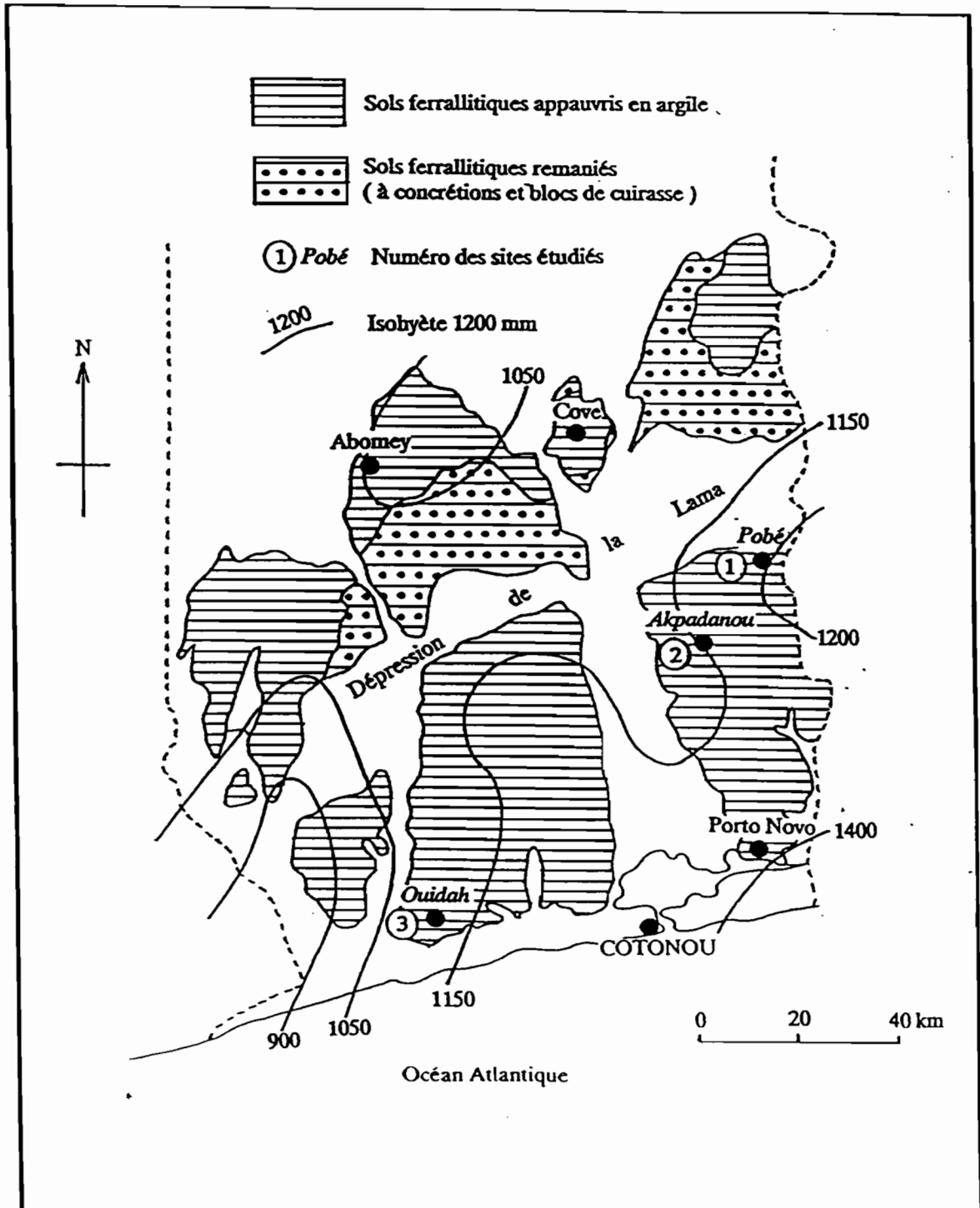
Le climat dans le Sud - Bénin est de type "Soudano-Guinéen".

Il est caractérisé par l'alternance de deux saisons de pluies et de deux saisons sèches d'inégales durées. La grande saison des pluies commence à la mi-mars et va jusqu'à la mi-juillet. Elle est suivie par une petite saison sèche qui dure jusqu'à la mi-septembre. La petite saison des pluies s'installe alors jusqu'à mi-novembre. Elle est suivie par la grande saison sèche.

Les cultures (par exemple de maïs) durant la seconde saison des pluies (second cycle) sont devenues de plus en plus aléatoires pendant ces dernières décades plus sèches. Récemment, POSS et SARAGONI (1987) ont mis en évidence un report, depuis une vingtaine d'années environ, de la petite saison pluvieuse vers la grande saison des pluies. L'évolution des hauteurs pluviométriques annuelles sur les sites étudiés est illustrée par les graphiques figurant en annexe I. 1. Par ailleurs, la pluviométrie varie à l'intérieur de cette région (tableau I. 1). Elle diminue d'Est (Pobè) en Ouest (Ouidah). (Figure I.1).

Figure I.1.

Sols sur terres de barre dans le sud du Bénin, isohyètes annuelles moyennes et localisation des sites



d'après Raunet M. (1973)

Tableau 1.1
Evolution de la pluviométrie dans le Sud-Bénin

ANNEES	1975-1980	1981-1986	1987-1990	Moyenne (1975-1990)
SITES				
1. POBE	1112 mm	1106 mm	1380 mm	1124 mm
2. AKPADANOU	1219 mm	980 mm	1283 mm	1160 mm
3. OUIDAH	973 mm	1015 mm	862 mm	950 mm

Les variations des températures dans la journée et dans l'année sont faibles. La moyenne annuelle de température est de 27 °C. Les températures moyennes mensuelles minima sont atteintes au mois de Juillet ou d'Août (20-23 °C) et les maxima de température observées au mois de Février ou Mars sont de l'ordre de 32-34 °C.

L'hygrométrie est élevée; elle est toute l'année proche de 80 %.

2. LA GEOMORPHOLOGIE

Le Sud du Bénin est dominé par des plateaux dont les largeurs peuvent atteindre 30 à 80 km. Ils sont entrecoupés par des accidents orogéniques anciens et les cours d'eau actuels. Leur altitude varie entre 20 et 100 m et le paysage très faiblement ondulé a des pentes généralement inférieures à 1 %.

3. LA VEGETATION

Les différents types de végétation climacique sont :

- sur le cordon littoral, une savane à *Lophira lanceolata* et au bord des lagunes des mangroves à *Rhizophora racemosa* et *Avicennia africana*
- dans la dépression de la Lama, une forêt dense sèche où domine *Dyospyros mespiliformis*
- enfin sur les plateaux des terres de barre, une forêt dense semi - décidue.

Cette végétation climacique a disparu presque partout du fait de la forte pression démographique et il n'en existe actuellement que quelques îlots forestiers résiduels très secondarisés et isolés.

4. LES PRINCIPAUX SOLS DANS LE SUD-BENIN

Les principaux types de sols du Sud - Bénin ont été inventoriés et décrits au cours de prospections pédologiques par des chercheurs de l'ORSTOM (VOLKOFF et WILLAIME, 1976; VOLKOFF, 1976) et au cours des études préliminaires pour la mise en oeuvre d'opérations de développement comme pour le Plan Palmier (IRHO, 1964).

Les sols de cette région qui se différencient par leurs caractères pédologiques et leur aptitude culturale occupent des surfaces très inégales :

- Les sols rouges de plateau (localement appelés terres de barre) sont les plus représentés (60 %)
- Les sols hydromorphes alluviaux périodiquement inondés occupent 25 % de la surface
- Les sols vertiques plus argileux mais périodiquement engorgés de la dépression de la Lama couvrent seulement 10 % de la surface
- Les sols sableux des cordons littoraux qui sont plus ou moins salés n'occupent que 4 % de la superficie.

Notre étude portera exclusivement sur les sols rouges ferrallitiques développés sur les plateaux de terres de barre. Ils constituent l'essentiel du terroir de cette région (Figure I.1) tant pour les cultures vivrières annuelles que pour les plantations pérennes.

5. LE MILIEU HUMAIN ET UTILISATION DU SOL

Le Sud du Bénin est une zone densément peuplée. La densité moyenne est de 80 habitants/km² et elle peut atteindre localement 300 habitants/km² contre 20 dans le Nord (Projet PNUD/FAO, 1977). Il y a donc une forte pression anthropique sur l'utilisation des terres ce qui a pour conséquence une réduction de la taille des exploitations et de la durée de la jachère arbustive comme l'illustrent les données du tableau I. 2.

Tableau I.2
Taille des exploitations et utilisation des sols

	BENIN	MONO*	OUEME*	ATLANTIQUE*
Taille des exploitations				
< 1 ha (%)	34	68	48	34
> 5 ha (%)	4	2	0	3
Terres défrichées dans l'année (%)	24	14	18	32
Défrichées depuis 4 ans et plus (%)	32	45	54	28

* Départements du Sud-Bénin

N.B. Les trois sites étudiés se répartissent dans les départements de l'Ouémé et de l'Atlantique

6. CONCLUSION

L'exploitation agricole des terres de barre qui est déjà très ancienne est devenue au cours des dernières décades de plus en plus continue. Elle a été accompagnée d'une dérive des systèmes de culture traditionnels et d'une dégradation des propriétés physiques et chimiques de ces terres. De nombreux travaux de recherches agropédologiques ont été entrepris en particulier par l'ORSTOM (DABIN 1956) et l'IRAT (WERTZ, 1979) pour identifier des systèmes de cultures durables. Le chapitre suivant sera consacré à la description détaillée de ces sols sur terres de barre.

CHAPITRE II

CARACTERISTIQUES DES SOLS ETUDIES

1. GENERALITES

Les terres de barre sont des sols rouges sableux faiblement argileux qui occupent l'ensemble des plateaux de faible altitude (20 à 100 m) du Sud-Bénin et de topographie assez plane (pente inférieure à 1 %). Ils sont développés sur des formations sédimentaires détritiques du Continental Terminal dont les limites se situent entre l'Eocène marin et les dépôts récents fluvio-lacustres. Ces formations ont une épaisseur de quelques mètres à quelques centaines de mètres et sont constitués généralement de grès plus ou moins argileux et peu indurés, de sables et d'argiles de couleur jaune ou rouge selon la nature et la teneur en fer des couches.

On retrouve ces sols rouges également au Sud du Sénégal, sur les franges côtières de la Guinée Bissau, de la Guinée Conakry et de la Sierra Leone, au Sud-Est de la Côte d'Ivoire , au Sud-Ouest du Ghana, au Sud du Togo et au Nigéria.

FAUCK (1972), en comparant les matériaux originels des sols rouges d'Afrique Occidentale, a retenu trois caractéristiques pour ces terres de barre :

- leur état d'altération très élevé,

- le squelette sableux, essentiellement quartzeux, représente une forte proportion du poids du sol,
- leur cohésion est en général faible. La porosité est élevée facilitant ainsi l'infiltration en profondeur des eaux de pluies.

Les différents caractères de ces matériaux originels orientent la pédogenèse des terres de barre vers des voies que FAUCK (1972) résume en trois étapes :

- la désilicification des grains de quartz par solubilisation et évacuation dans les eaux de nappe. L'une des conséquences de ce processus est l'enrichissement relatif en argile des couches de profondeur,
- la rubéfaction qui est liée à la dynamique du fer dans ces roches. Le fer cristallisé en présence de la silice soluble serait transformé en fer sous forme dite amorphe qui s'accumule relativement. La couleur rouge de ces sols est principalement due à la présence du fer sous forme d'hématite.
- l'appauvrissement en argile des horizons supérieurs qui est provoqué par deux mécanismes:
 - une érosion sélective de la fraction argileuse dans la couche superficielle, l'intensité du phénomène variant en fonction de la position topographique, de la pente et de la couverture végétale,
 - et un lessivage vertical ou oblique de certains constituants (acides fulviques, kaolinite, silice, hydroxydes de fer amorphe, aluminium non silicaté etc).

Dans notre étude, la différenciation de ces sols en fonction de la topographie est très limitée sur les plateaux en raison des pentes très faibles. Les sols de bas de versants qui ont une texture plus sableuse et dont le bilan hydrique est différent n'ont pas été retenus ici.

2. DESCRIPTION MORPHOLOGIQUE ET CARACTERISTIQUES ANALYTIQUES DES SOLS SOUS FORET

2.1 Description morphologique

2.1.1. Site de Pobè (Site 1)

Le profil sous forêt se présente comme suit :

0 à 8 cm :

Brun (5 YR 4/4). Sableux fin limoneux. Structure particulaire 50 % , fragmentaire très nette 50%. Très peu compact. Feutrage racinaire avec diamètre dominant d'environ 1 mm, distribution régulière.

Eléments structuraux de taille inférieure à 5 mm à faces planes et courbes avec arêtes émoussées sans allongement préférentiel; très fragiles. Présence de nombreux turricules de vers. Nombre de pores supérieur à 4 par cm², ils sont cylindriques et ont un diamètre inférieur à 2 mm.

Transition très nette.

8 à 18 cm :

Brun rougeâtre (5 YR 4/6). Sableux fin. Structure massive. Peu compact. Nombre de racines supérieur à 20 par dm² avec un diamètre dominant inférieur à 2 mm, présence de racines moyennes de 5 à 10 mm préférentiellement à la limite inférieure de l'horizon. Fragile.

Quatre à cinq pores cylindriques de diamètre inférieur à 2 mm par cm², présence de 10 à 15 chenaux par dm² de diamètre compris entre 2 et 5 mm.

Transition nette

18 à 35 cm :

Brun rougeâtre (2,5 YR 4/6). Sableux fin faiblement argileux. Structure massive. Compact. Nombre de racines compris entre 5 et 10 par dm² avec un diamètre inférieur à 2 mm, distribution régulière. Fragile.

Trois à quatre pores cylindriques par cm² de diamètre égal à 0,2mm.

Transition très nette.

35 à 45 cm :

Brun rouge sombre (2,5 YR 4/6). Argilo-sableux. Structure massive. Très compact. Nombre de racines inférieur à 5 par dm², leur diamètre est inférieur à 0.2 mm, la distribution est régulière. Peu fragile.

Le nombre de pores est supérieur à 5 par cm², leur diamètre est inférieur à 1mm.

Transition nette.

45 à 120 cm :

Rouge (10 R 4/6). Argileux. Structure fragmentaire peu nette. Très compact.

Nombre de racines inférieur à 1 par dm², diamètre inférieur à 2 mm.

Éléments structuraux présentant de nombreuses faces planes et courbes de taille inférieure à 2 mm à arêtes anguleuses sans allongement préférentiel; non fragile, assemblage interne massif. Deux pores cylindriques par cm² de diamètre inférieur à 0,5 mm. Légère hydromorphie marquée par un bariolage peu contrasté et des tâches noires de manganèse.

*2.1.2. Site d'Akpadanou (Site 2)***+ 4 à 0 cm :**

Horizon meuble constitué de déjections de vers, gris sombre limono-sableux, mélangées à des débris de végétation en cours de décomposition.

0 à 10 cm :

Brun rouge sombre (2,5 YR 3/4). Sableux grossier. Structure particulière pour 2/3, fragmentaire très nette pour 1/3. Peu compact. Volume de vides important entre éléments structuraux. Nombre de racines supérieur à 20 par dm², de diamètre compris entre 2 et 6 mm, distribution régulière. Elles pénètrent dans les éléments structuraux.

Éléments structuraux à faces planes et courbes, avec des arêtes émoussées, de taille variant entre 1 et 10 mm, sans allongement préférentiel, assemblage interne massif, très fragiles. Trois à quatre pores cylindriques par cm², de diamètre égal à 1 mm.

Transition très nette.

10 à 20 cm :

Brun rouge sombre (2,5 YR 3/4). Sableux grossier. Structure massive. Assez compact à compact. Nombre de racines supérieur à 10 par dm², de diamètre compris entre 2 et 6 mm, distribution régulière. Très fragile.

Plus de quatre pores cylindriques par cm², de diamètre inférieur à 2 mm.

Transition distincte.

20 à 35 cm :

Brun rouge sombre (2,5 YR 4/6). Sableux grossier faiblement argileux. Structure massive. Compact.

Deux à trois racines par dm², de diamètre variant entre 2 et 3 mm, distribution régulière. Fragile.

Deux à trois pores cylindriques par cm², de diamètre inférieure à 1 mm.

Transition distincte.

35 à 55 cm :

Rouge sombre (10 R 3/6). Sableux grossier argileux. Structure massive. Très compact. Nombre de racines inférieur à 1 par dm², de diamètre compris entre 2 et 3 mm, distribution régulière. Non fragile.

Quatre à cinq pores cylindriques par cm², de diamètre inférieur à 2mm.

Transition graduelle.

55 à 120 :

Rouge (10 R 4/6). Argilo-sableux. Structure massive. Très compact. Quelques racines de diamètre inférieur à 2 mm. Non fragile.

Trois pores cylindriques par cm², de diamètre inférieur à 2 mm.

2.1.3. Site de Ouidah (Site 3)

Un profil représentatif sous forêt se présente comme suit :

0 à 8 cm :

Brun rouge (5 YR 3/3). Sableux grossier. Structure particulaire (1/3) et fragmentaire très nette (2/3). Peu compact. Volume des vides importants entre éléments structuraux. Nombre de racines supérieur à dix par dm², de diamètre inférieur à 1,5 mm, elles pénètrent dans les éléments structuraux, distribution régulière.

Eléments structuraux à faces courbes et planes, arêtes émoussées, ne présentant pas d'allongement préférentiel, de taille inférieure à 10 mm. Très fragile, assemblage interne massif. Quatre à cinq pores cylindriques par cm², de diamètre égal au mm.

Transition très nette.

8 à 25 cm :

Brun (5 YR 4/3). Sableux grossier. Structure massive. Assez compact passant à compact. Nombre de racines supérieur à cinq par dm².

Quatre à cinq pores cylindriques par cm², de diamètre égal à 1 mm.

Transition nette.

25 à 50 cm :

Rouge-brunâtre (2,5 YR 4/6). Sableux grossier faiblement argileux. Structure massive. Compact. Nombre de racines supérieur à 5 par dm², de diamètre inférieur à 5 mm, distribution régulière. Peu fragile.

Quatre pores cylindriques par cm² de diamètre inférieur à 1 mm, un chenal de diamètre supérieur à 2 mm par dm².

Transition distincte.

50 à 120 cm :

Rouge (10 R 4/6). Sablo-argileux passant à argilo-sableux. Structure massive. Très compact. Une racine par dm² de diamètre inférieur à 5 mm. Non fragile.

Quatre pores cylindriques par cm² de diamètre égal à 1 mm, un chenal de diamètre supérieur à 2 mm par dm².

2.1.4. Conclusion

Les profils sous forêt sont formés de trois ensembles d'horizons séparés par des transitions nettes (site 1) ou graduelles (site 2 et site 3) :

- Un horizon A humifère, sableux et dont l'épaisseur est de 18, 20 et 25 cm respectivement sur les sites 1, 2 et 3. Il est plus assombri par la matière organique sur le site 1. Sur les trois sites, il présente une structure particulière associée à des éléments structuraux plus liés aux racines fines. Les éléments structuraux sont de taille variable (5 à 10 mm) ; ils ont des faces planes et courbes et ne présentent pas un allongement préférentiel. On note dans cet horizon la présence d'un feutrage racinaire

important, les plus fines pénétrant dans les éléments structuraux. La porosité tubulaire est élevée (plus de quatre pores par cm² de diamètre compris entre 0,5 et 1 mm). Sur le site 1, on note en plus la présence de chenaux (10 à 15 chenaux de diamètre compris entre 2 et 5 mm par dm²) liée à l'activité de la macrofaune. La compacité est faible.

- Un horizon AB de pénétration humifère, sablo-argileux, de couleur homogène ocre rouge vif, plus épais sur le site 2 (35 cm d'épaisseur) que sur les sites 1 et 3 (25 cm d'épaisseur). Il est caractérisé par une variation rapide de la texture sur le site 1 qui est de plus en plus argileuse vers le bas. La structure est massive. L'enracinement moins important que dans l'horizon précédent a une distribution régulière. La porosité reste élevée, quatre à cinq pores cylindriques de diamètre inférieur à 2 mm par cm². La compacité est moyenne.
- Un horizon B, peu humifère, argileux sur le site 1 et argilo - sableux sur les sites 2 et 3, de couleur rouge, à structure fragmentaire peu nette en agrégats anguleux sur le site 1 et massive sur les sites 2 et 3. On note la présence de quelques racines de diamètre inférieur à 2 mm et dont la distribution reste régulière. L'abondance des pores reste importante (2 à 3 pores cylindriques par cm²) mais leur diamètre est plus faible (inférieur à 0,5 mm). La compacité est très élevée.

Les transitions entre les horizons des sols sur terres de barre sont graduelles ou progressives. Néanmoins le sol du site 1 présente un gradient textural plus brusque dont nous verrons les conséquences sur les caractéristiques physiques et le fonctionnement des sols.

2.2. Caractéristiques analytiques

L'analyse granulométrique a montré que la teneur en argile qui est comprise entre 5 et 12 % jusqu'à 15 cm de profondeur, augmente progressivement pour les sols des sites 2 et 3 et plus rapidement dans l'horizon AB pour le sol du site 1. Dans les deux cas aucun horizon d'accumulation ne peut être identifié par un "ventre" d'argile par les observations morphologiques du profil pédologique.

Plusieurs séries de sols rouges sur terres de barre au Bénin et au Togo ont été distinguées en fonction de la teneur en argile de l'horizon B et de l'épaisseur des horizons A et AB appauvris en argile. De ce point de vue le sol du site 1 appartiendrait à la série "RA" dont l'horizon B a des teneurs en argile supérieures à 45 % et l'horizon appauvri est peu épais. Au contraire, les sols des deux autres sites se classent dans la série "RS", l'horizon B a moins de 35 % d'argile et l'horizon appauvri est beaucoup plus épais (IRHO, 1964).

L'analyse minéralogique de la fraction argileuse montre qu'elle est surtout constituée de kaolinite, de goethite et d'hématite avec des traces de minéraux interstratifiés qui proviendraient de résidus illitiques des roches mères de ces sols.

Les teneurs en limons fins (2 à 20 μm) très faibles (moins de 5%) sont caractéristiques des vieux sols ferrallitiques; du fait de la nature des argiles qui dominent dans ces sols (silicate argileux 1/1), donc des minéraux d'assez grande taille et susceptibles de se retrouver dans la classe 2-20 μm , nous avons, dans les discussions ultérieures, regroupé les fractions 0-2 et 2-20 μm en une seule fraction 0-20 μm nommée "éléments fins" ou "A + L".

La teneur en "A + L" du site 1 est supérieure à celles des sites 2 et 3 (Tableau II.1). Par ailleurs, le même site possède des teneurs plus élevées en sables fins (Tableau II.2)

Tableau II.1

Teneurs en éléments fins (< 20 μm) des sols sous forêt

	Site 1	Site 2	Site 3
0 - 15 cm	15,9	8,2	8,9
15 - 35 cm	12,2	9,3	8,2
35 - 50 cm	24,0	8,1	9,5
50 - 70 cm	52,8	15,8	13,9
100 - 120 cm	53,5	30,6	35,1

Tableau II.2

Rapports sables fins (Sf) sur sables grossiers (Sg)

	Site 1	Site 2	Site 3
0 - 15 cm	2,2	0,3	0,5
35 - 50 cm	1,9	0,4	0,4
100 - 120 cm	2,5	0,3	0,5

La densité apparente, qui est analogue sous forêt dans la couche 0 - 15 cm de ces trois sites ($d = 1,2$ à $1,3$) augmente plus rapidement dans le site 1 et atteint des valeurs élevées en profondeur. Sous forêt, on observe un maximum relatif entre 15 et 35 cm qui correspond à un horizon un peu plus compact. D'après CHAUVEL (1977), cet horizon compact observé également dans les sols rouges de la Casamance serait l'objet d'une dégradation actuelle.

La matière organique de ces sols forestiers sur terre de barre est assez abondante (Tableau II. 3). Les taux de carbone, qui varient entre 1,64 et 1,06 % dans la couche 0 - 15 cm, sont plus élevés sur le site 1 que sur les deux autres sites; ils baissent assez rapidement dans les deux premiers décimètres puis plus régulièrement ensuite pour atteindre seulement 0,25 % entre 100 et 120 cm. Les teneurs en azote varient entre 1,4 ‰ et 0,8 ‰ et diminuent en profondeur, moins vite que le carbone. Les rapports C/N voisins de 12 pour les horizons superficiels, varient peu d'un site à l'autre. Ces valeurs sont du même ordre de grandeur que celles signalées par BOYER (1982) pour les sols ferrallitiques sous végétation naturelle forestière. Elles traduisent une bonne décomposition de la matière végétale provenant de la litière et du système racinaire. Le rapport C/N diminue avec la profondeur pour atteindre des valeurs de l'ordre de 8.

Tableau II.3*Teneurs en C (%), en azote (‰) et rapport C/N des sols sous forêt*

		Site 1	Site 2	Site 3
C %	0 - 15 cm	1,64	1,44	1,06
	35 - 50 cm	0,53	0,51	1,43
	100 - 120 cm	0,25	0,39	0,25
N ‰	0 - 15 cm	1,37	1,27	0,86
	35 - 50 cm	0,47	0,41	0,32
	100 - 120 cm	0,32	0,46	0,28
C / N	0 - 15 cm	11,9	11,3	12,3
	35 - 50 cm	11,2	12,5	13,2
	100 - 120 cm	7,7	8,6	8,8

La capacité d'échange cationique varie dans l'horizon humifère de surface dans le même sens que les teneurs en matière organique : 7.17, 6.80 et 3.70 cmol. kg⁻¹ (ou meq/100 g) de sol respectivement sur les sites 1, 2 et 3. Elle diminue en profondeur, et semble se stabiliser dans l'horizon B autour de 1,5 à 3 cmol. kg⁻¹ de sol. Ce complexe argilo-humique est saturé principalement par le calcium et le magnésium qui représentent plus de 90 % de la somme des bases échangeables. Le potassium est très faible surtout en profondeur où il est à la limite de la précision du dosage (annexe II.1).

Le pH (eau) de l'horizon humifère de surface de ces sols ferrallitiques forestiers est proche de la neutralité (6,30 à 7,50). Il diminue ensuite en profondeur et dans l'horizon B il est compris entre 5,3 et 6,3. Le taux de saturation (100 x Somme des bases/CEC) est proche de 100 en surface et diminue sensiblement avec la profondeur particulièrement sur les sites 1 (78 %) et 3 (82 %).

Malgré la texture sableuse des horizons supérieurs de ces sols forestiers, la décomposition rapide de la litière peu épaisse donne naissance à un humus doux, relativement riche en azote et saturé en bases échangeables. Avec PERRAUD (1970), nous l'appellerons "mull forestier tropical eutrophe".

2.3. Classification des sols sur terres de barre

Dans la classification CPCS (1967), ces sols sur terres de barre appartiennent au groupe *des sols ferrallitiques faiblement désaturés, appauvris en argile*. Dans le système de classification FAO, (1989), il s'agit de Ferralsol Rhodique, mollique sous forêt et ochrique sous culture; et pour la Soil Taxonomy USDA, ce sont des Eustrustox.

3. CONCLUSION

Les terres de barre sur les trois sites étudiés forment des ensembles relativement analogues de sols rouges ferrallitiques dont les horizons supérieurs sont appauvris en argile et dont l'horizon B est faiblement désaturé. Les principaux caractères sont les suivants :

- un horizon de surface, humifère, sableux, dont l'épaisseur est plus importante sur les sites 2 et 3 que sur le site 1,
- un horizon AB sablo-argileux sur le site 1 et sablo-faiblement-argileux sur les sites 2 et 3,
- un horizon B argileux sur le site 1 et argilo-sableux dans les deux autres sites. On note l'absence de trace d'hydromorphie au niveau de cet horizon ce qui s'explique par la porosité élevée de ces sols,
- les matières organiques déjà assez évoluées en surface ont des teneurs en azote relativement élevées avec un rapport C/N compris entre 11 et 12.

Ces trois sites sont représentatifs des deux principales séries des sols rouges ferrallitiques sur terres de barre. Sur ces plateaux, co-existent à la fois des plantations industrielles de palmiers à huile, des plantations forestières et des cultures vivrières. Le chapitre qui suit décrit les techniques culturales utilisées dans ces différents systèmes de culture.

CHAPITRE III

DESCRIPTION DE LA FORET ET DES SYSTEMES DE CULTURES

1. PRESENTATION GENERALE DE LA FORET ET DES SYSTEMES DE CULTURES ETUDIES

La figure III.1 schématise les paysages agricoles et le tableau III.1 résume quelques caractéristiques des parcelles étudiées.

1.1. La forêt

La végétation climacique est une forêt ombrophile semi-sempervirente fortement secondarisée par endroit. Cette forêt ci-après désignée par (F) existe sous forme d'îlots occupant des superficies restreintes dont le plus important est celui du site 1. L'étude botanique de ces îlots a été réalisée récemment par AKOAGNINO (1984). Les espèces qu'on y rencontre fréquemment dans la strate arborée dominante sont : *Triplochiton scleroxylon*, *Antiaris toxicaria* var *africana*, *Terminalia superba* et *Ceiba pentadra*.

Sur le site 1, l'apport annuel de litière a été évalué par SOKPON et LEJOLY (1991) à 9,4 t de MS /ha, chiffre voisin de ceux obtenus par NYE (1961) au Ghana (9,66 t de MS / ha / an) et par PROCTOR (1984) pour les forêts denses tropicales (6 à 15 t de MS / ha / an). La proportion relative de feuilles dans la composition de la litière dans ces forêts est assez élevée même si les chiffres avancés varient dans des proportions assez larges: 66 % pour MADGE (1965) au Nigéria, 80 % pour DEVINEAU (1973) en Côte d'Ivoire et 78,2 % pour SOKPON et LEJOLY (1991) au Bénin. Cette biomasse évolue très rapidement au cours de l'année et la litière qui recouvre le sol est peu épaisse et devient discontinue en saison des pluies.

En raison de la forte pression démographique, ces forêts denses et même les jachères forestières spontanées ont généralement disparu au cours des dernières décades. L'espace agricole est maintenant dominé par des plantations villageoises et industrielles de palmiers à huile et surtout par les cultures vivrières.

1.2. Les plantations forestières

Les plantations d'essence forestière (PF) sont des replantations après cultures vivrières. Dans le cadre de notre étude, ces situations permettent de simuler l'effet d'une jachère forestière plantée sur la reconstitution du stock organique de ces sols. Elles sont généralement âgées de plus de 20 ans. Les espèces que l'on rencontre fréquemment dans cette zone sont: *Eucalyptus* sp, *Acacia auriculiformis*, *Cassia siamea* et *Tectona grandis*. Sur deux des sites, nous avons retenu une parcelle de *Cassia siamea* (site 2) et une parcelle de *Tectona grandis* (site 3). Il s'agit de parcelles paysannes à densité de plantations élevée (1500 à 2500 pieds par hectare). Ces deux espèces, souvent plantées en monoculture, servent à satisfaire la demande urbaine en bois de chauffe et en bois d'oeuvre.

1.3. Les plantations de palmiers à huile

Les plantations de palmiers à huile retenues dans le cadre de cette étude ont été installées en replantation sur une vieille palmeraie pour le site 1, et sur défriche de jachère pour les sites 2 et 3. Elles sont âgées de plus de 20 ans.

Sur le site 1, la préparation du terrain a nécessité l'utilisation d'engins puissants. Des tracteurs à chenilles de 300 CV munis de poussoirs ont abattu et essouché des arbres en une seule opération. Les arbres après tronçonnage ont été andainés avec des tracteurs. Sur le site 2 (partiellement envahi par *Imperata cylindrica*) et sur le site 3, la préparation du sol avant plantation a consisté en un labour profond (jusqu'à 30 - 40 cm) suivi d'une dizaine de passages environ de pulvérisateurs lourds et légers.

Figure III.1

*Coupe schématique des systèmes de cultures de la Province de l'Atlantique en direction Sud-Nord
(d'après : Pfeiffer, 1988 "Agriculture au Sud-Bénin")*

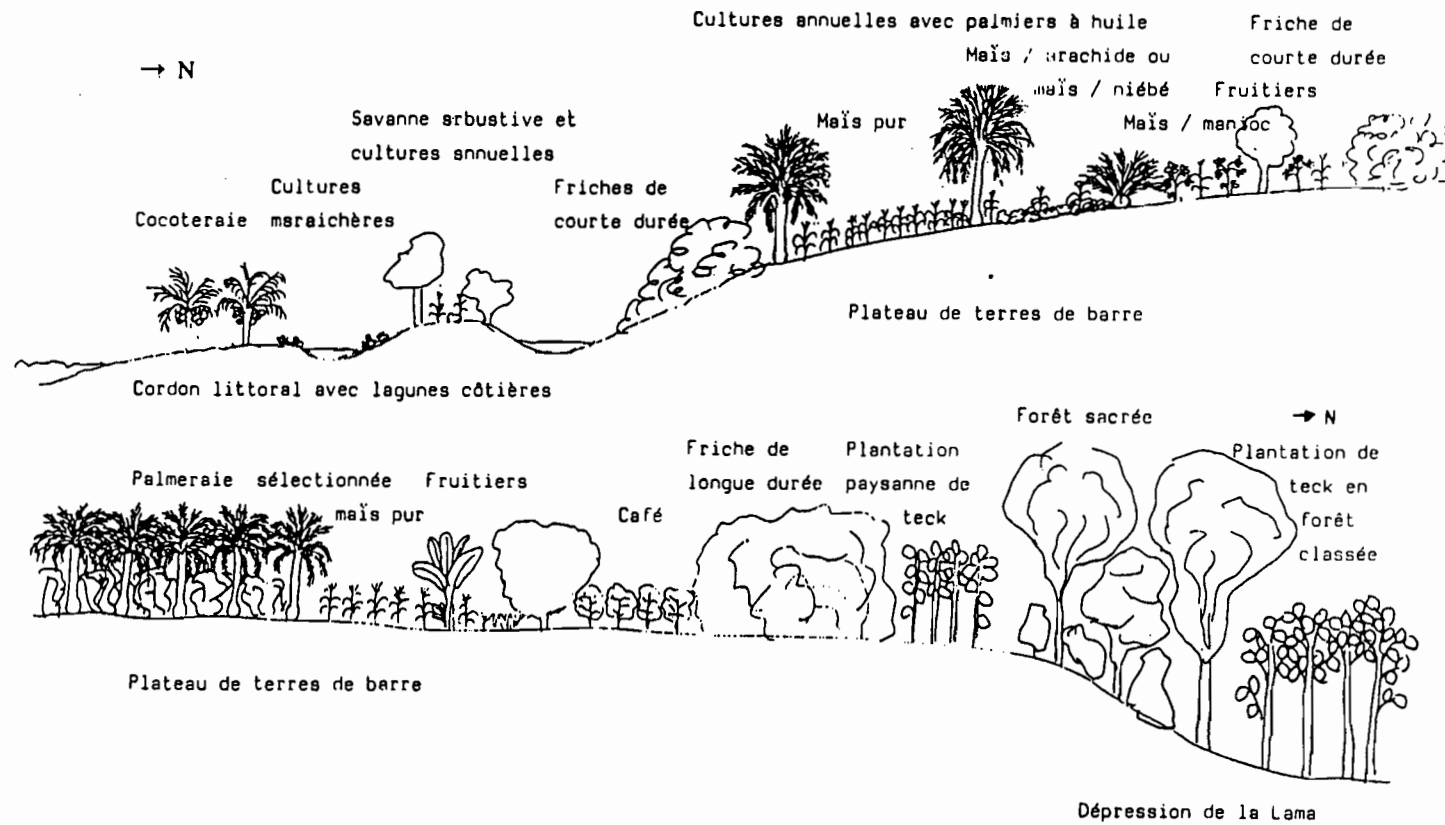


Tableau III.1

Passé culturel des situations étudiées

SITES	1. POBE	2. AKPADANOU	3. OUIDAH
Parcelles			
Forêt (F)	Forêt dense semi - décidue	Forêt faiblement secondarisée	Forêt très secondarisée
Plantation forestière (PF)	-	Plantation de Cassia (21 ans)	Plantation de Teck (22 ans)
Palmeraie sol couvert (PSC)	1ère plantation 1957 (32 ans)	1ère plantation 1969 (21 ans)	1ère plantation 1973 (16 ans)
Palmeraie sol nu (PSN)	1ère plantation 1957 (32 ans)	1ère plantation 1969 (21 ans)	-
Cultures vivrières (CV)	30-40 ans	> 20 ans	> à 14 ans
<i>Teneurs en argile (%) de l'horizon (B)</i>			
Forêt	47,40	33,50	28,40
Plantation forestière	-	39,50	39,40
Palmeraie sol couvert	47,40	28,40	30,60
Palmeraie sol nu	42,90	29,60	-
Cultures vivrières	-	34,70	33,20

A la plantation, les palmiers sont disposés au sommet d'un réseau hexagonal qui a un écartement de 9 m. Les écarts entre les lignes de plantation sont donc de 9 m et entre les palmiers sur la ligne il est de 7 m 80, ce qui permet d'obtenir une densité de plantation de 143 arbres par hectare.

Sur chacun des sites 1 et 2, il a été retenu deux parcelles de palmiers qui diffèrent par la couverture du sol dans les interlignes au jeune âge: la palmeraie sol couvert au jeune âge (PSC) et la palmeraie sol nu au jeune âge (PSN):

- Dans le premier cas (PSC), une plante de couverture a été implantée dès la plantation de palmiers. Il s'agit d'un mélange de légumineuses rampantes composé de *Pueraria javanica* et de *Centrosema pubescens*. Par la suite l'entretien de cette couverture est assuré par des désherbages sélectifs et des rabattages réguliers à la machette. La couverture herbacée régresse progressivement avec le temps (vers l'âge de six ans) sous l'effet de la concurrence avec les palmiers pour la lumière. La plante de couverture est en partie remplacée par une végétation dominée par *Eupatorium odoratum*, particulièrement sur le site 2.
- Dans le second cas (PSN), le sol est maintenu nu par des passages réguliers de pulvérisateurs à disques autant de fois que nécessaire. En moyenne, cinq à six passages annuels sont pratiqués au jeune âge. Quand l'enherbement est important, un passage en diagonale complète le passage normal dans le sens des lignes. Cette technique est destinée à limiter la concurrence hydrique du couvert végétal qui se développe dans les interlignes.

Après quelques années, lorsque les palmiers sont bien développés et la couverture de légumineuses a disparu, les deux types de parcelles (PSC et PSN) ont été entretenues de la même manière soit par deux à trois passages annuels de landaise ou de pulvérisateurs à disques sur le site 1, soit par des interventions manuelles à la machette sur le site 2.

Sur le site 3, une seule parcelle sous palmiers a été étudiée. Le mode d'entretien des interlignes a été le suivant: semis des légumineuses dans les interlignes à la plantation suivi d'entretien manuel; l'intervention mécanisée a été limitée sur ce site à la préparation du sol avant plantation.

A l'âge adulte le palmier à huile comprend les racines, le stipe et la couronne. Les feuilles qui constituent la couronne mesurent 5 à 7 m de long avec un pétiole de 1,5 m de long environ et une centaine de folioles. La couronne du palmier à huile adulte comprend 40 feuilles environ. Pour faciliter la récolte, les feuilles sèches ou celles situées en dessous de régimes sont "élaguées", coupées en morceaux et disposées en andains entre les arbres sur la ligne de plantation. Les quantités de matière sèche ainsi restituées au sol sont assez importantes et ont été évaluées à 10 t de MS/an en Côte d'Ivoire d'après HARTMANN (1991). Avec le temps, il se constitue un tas de palmes entre les palmiers qui peut atteindre une largeur variant entre 2,5 m et 3 m (fig. V.1b).

Par ailleurs, dès la plantation et pendant toute la période de production, un "rond" de 4 à 5 m de diamètre est maintenu sans végétation, par désherbage régulier ou application d'herbicide autour de chaque palmier. Les engrais appliqués dans les ronds bénéficient ainsi seulement aux palmiers. Cette technique facilite aussi le glanage des fruits détachés des régimes.

Cette technique de plantation et les divers modes d'entretien décrits ci-dessus entraînent une hétérogénéité spatiale du point de vue des systèmes racinaires, des restitutions organiques et du bilan hydrique. Les "ronds" autour des arbres, gardés sans végétation représentent 15 % de la superficie. Les andains occupent 25 % de la surface où sont concentrées et se décomposent les feuilles d'élagage de palmiers. Les interlignes occupent environ 60 % de la superficie. Nous verrons au chapitre V les contraintes qu'impose cette hétérogénéité du sol pour l'évaluation des stocks organiques des sols sous palmeraie.

1.4. Les cultures vivrières

Les principales cultures vivrières qui sont réalisées, soit successivement, soit en association sont: le maïs (*Zea mays*), le manioc (*Manihot esculenta*), l'arachide (*Arachis hypogea*) et le niébé (*Vigna unguiculata*).

Le système de culture dominant est la culture sur brûlis avec friche arbustive. Après le défrichement à la machette, le brûlis assure le nettoyage de la parcelle et fertilise rapidement la parcelle par les éléments minéraux accumulés dans la végétation herbacée ou ligneuse pendant la période de friche. Les avantages et les inconvénients de cette pratique utilisée dans de nombreux pays tropicaux ont été discutés par SANCHEZ

(1973). Dans le Sud du Bénin, après la première année de culture, le défrichement à la machette n'est plus nécessaire; la parcelle est nettoyée à la houe et le semis est effectué en poquet dans des trous réalisés à l'aide d'un bâton ou à la machette. La période de culture dure de trois à cinq ans suivie d'une période de friche de même durée en tout cas dépassant rarement cinq ans. La régénération des terres par cette courte jachère n'est pas toujours suffisante et l'on observe généralement une baisse de la fertilité des sols. PFEIFFER (1988) note que les rendements de maïs sans apport de fumure peuvent passer en moyenne de 2300 kg/ha après une friche arbustive à seulement 700 kg/ha après trois saisons agricoles (un an et demi).

Dans les régions où la baisse de la fertilité des sols sur terres de barre est plus accusée, la pratique du billonnage est de plus en plus répandue. Les résidus de la récolte précédente sont arrachés et rassemblés à l'endroit où doit se confectionner le billon. La terre du billon provient essentiellement de mottes prélevées avec le système racinaire dans la couche superficielle (0-12 cm) du sol de l'interbillon. Par cette pratique, la couche du sol la plus riche en éléments fertilisants est concentrée sur une surface réduite, et les plantes sont semées ou bouturées dans le billon relativement plus riche en matières organiques et en éléments minéraux disponibles.

Dans le cadre de cette étude, les parcelles retenues se situent précisément dans des zones dont les sols sous culture presque continue ont une faible fertilité. Les parcelles de cultures vivrières ont été installées depuis plus de 14 ans. Les billons observés et prélevés avaient une dizaine de centimètres de haut et étaient espacés de 80 cm. Après un an de culture, les billons sont refaits dans l'interbillon. Ces cultures vivrières en billons sont réalisés sans apport d'engrais minéraux et conduites jusqu'à épuisement du sol. Cette pratique est alors alternée avec une jachère naturelle de courte durée (deux à trois saisons agricoles).

2. CRITERES PARTICULIERS AU CHOIX DES PARCELLES ET REPARTITION GEOGRAPHIQUE

Pour comparer les différents systèmes de cultures sur un même site, il fallait s'assurer de l'homogénéité texturale des profils, et en particulier, que les teneurs en éléments fins des

horizons profonds soient analogues. Après une enquête exploratoire nous n'avons donc retenu que les profils qui présentaient des teneurs voisines en éléments fins dans l'horizon B. De plus, les rapports identiques sables fins/sables grossiers dans ces horizons indiquent que les sols de chaque site se sont développés à partir d'un même matériau originel (tableau III.2).

Tableau III. 2

Rapports sables fins (Sf) sur sables grossiers (Sg) dans les horizons 50-70 et 100-120 cm des parcelles représentatives des différents systèmes de cultures sur les sites 1 (Pobè), 2 (Akpadanou) et 3 (Ouidah)

Passé cultural						
Profondeur (cm)		F	PF	PSC	PSN	CV
SITE 1	50-70	1,9	-	1,8	1,8	-
	100-120	2,5	-	2,0	1,8	-
SITE 2	50-70	0,32	0,28	0,42	0,43	0,41
	100-120	0,30	0,31	0,47	0,44	0,46
SITE 3	50-70	0,32	0,54	0,33	-	0,29
	100-120	0,50	0,82	0,35	-	0,30

F : Forêt

PF : Plantation Forestière

CV : Culture Vivrière

PSC : Palmeraie Sol Couvert au jeune âge

PSN : Palmeraie Sol Nu au jeune âge

Sur le site 1, la parcelle de forêt et les parcelles de palmiers forment un groupe très homogène du point de vue textural. La parcelle de cultures vivrières est par contre établie sur un sol présentant un horizon fortement gravillonnaire à moyenne profondeur; cependant, la morphologie des 60 cm supérieurs est très comparable à celle des autres parcelles. Il n'a pas été possible de trouver sur ce site un sol comparable sous plantation forestière ancienne.

Sur le site 2, nous avons trouvé des parcelles avec des sols de texture analogue correspondant à tous les systèmes de culture que nous souhaitons comparer. Il faut cependant noter que la plantation forestière sur ce site, installée durant la même période que la palmeraie, a été déboisée et mise en cultures successives de maïs trois saisons agricoles (un an et demi) avant les prélèvements de sols.

Sur le site 3, nous avons pu prélever et comparer les sols correspondants aux différentes situations culturelles désirées et sur des sols de texture analogue.

3. CONCLUSION

L'ancienneté de ces situations culturelles n'est pas toujours identique, mais elle est supérieure à 15 ans (tableau III. 1). Les précédents culturels anciens ne sont pas toujours certains, particulièrement sur les sites 2 et 3, mais on peut considérer que la phase d'installation des agrosystèmes est dépassée et que ces sols sont en équilibre dynamique avec les systèmes de culture pratiqués.

Parmi les différents types d'utilisation des sols sur terres de barre qui sont illustrés par la figure III. 1 nous avons pu choisir sur chaque site des parcelles représentatives des trois ou quatre principaux systèmes de cultures pratiqués dans le Sud Bénin sur terres de barre et avoir un témoin sous forêt naturelle.

Les parcelles retenues dans chaque site, sous forêt et sous différents systèmes de culture sont assez proches et donc bénéficient d'un climat strictement identique. Les positions topographiques sont analogues. Les conditions de drainage externe identiques nous incitent à penser que l'érodibilité des sols de ces parcelles et l'aptitude à la lixiviation des constituants organiques et de l'azote sont très analogues. L'érosion réelle des terres de chaque site dépend donc essentiellement des systèmes de cultures pratiqués et de leur influence sur la couverture du sol, le bilan hydrique et le pédoclimat.

Dans le chapitre suivant, nous décrirons les principales modifications morphologiques et analytiques des sols en fonction des systèmes de cultures qui sont pratiqués.

CHAPITRE IV

MODIFICATIONS DES PROFILS ET DES CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DES SOLS APRES CULTURES OU PLANTATIONS FORESTIERES

1. CARACTERES MORPHOLOGIQUES ET PHYSIQUES

1.1. Caractères morphologiques

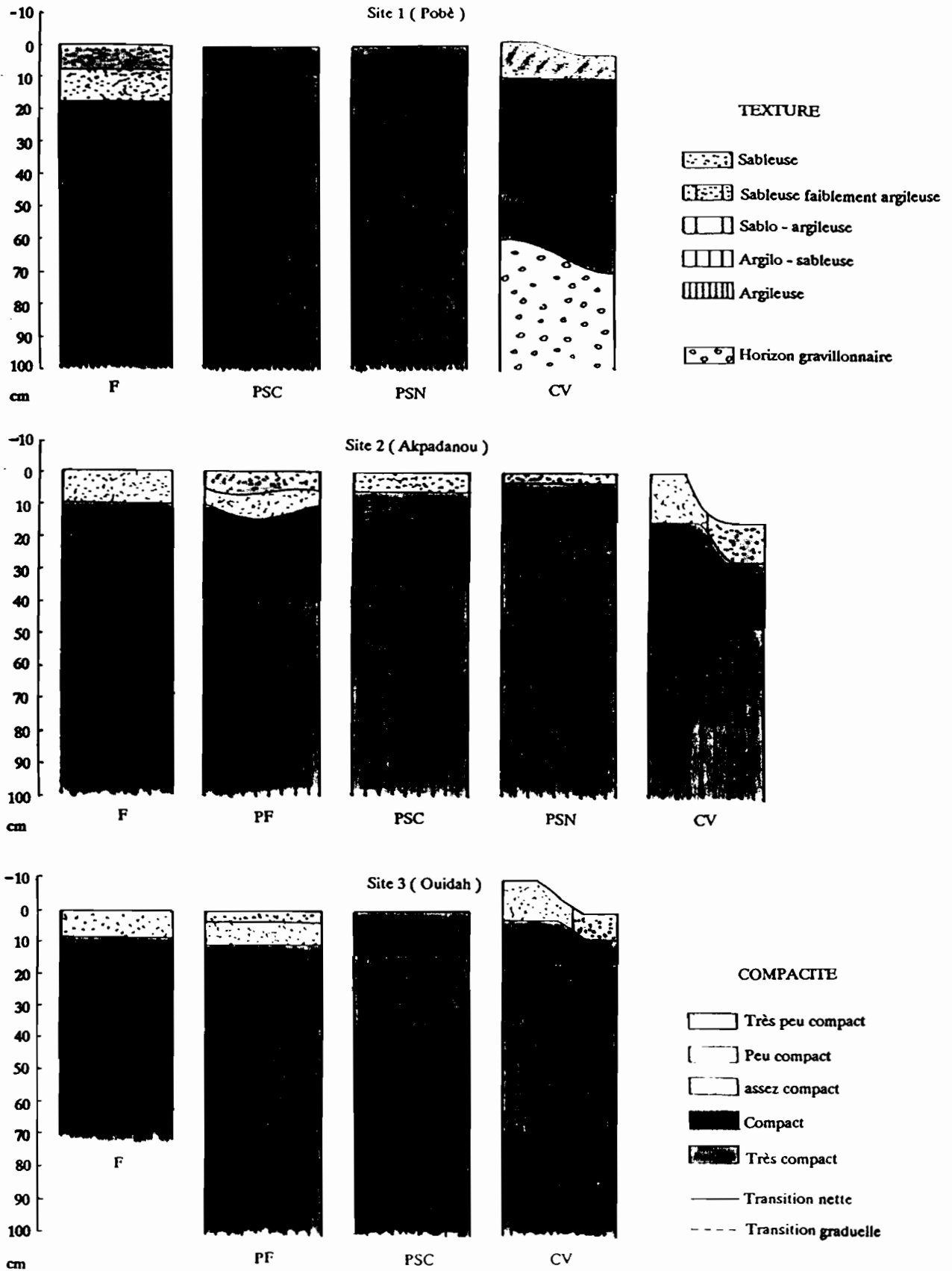
1.1.1. Les sols cultivés sous palmeraie

Le défrichement et l'installation des palmeraies entraînent une modification importante du profil cultural. On observe une succession d' horizons analogue à celle sous forêt avec toutefois les caractéristiques suivantes (Fig. IV.1) :

- un développement de la structure massive dans l'horizon superficiel ;
- une augmentation de la compaction des horizons appauvris en argile (A11 et A12) surtout sur les sites 1 et 3 où la compacité est très élevée dès la base de l'horizon A11 ainsi que sur le site 2 sous palmeraie sol nu au jeune âge (PSN) (tableau IV. 1). Par contre sur ce site dont le sol a été conservé au jeune âge sous une plante de couverture (PSC), le profil se différencie peu du profil forestier en ce qui concerne les critères comme la structure et la compacité.

Figure IV.1

Représentation schématique des sols sous forêt (F) et sous différents systèmes de culture (PF = Plantations Forestières ; PSC et PSN = Palmeraie Sol Couvert ou nu au jeune âge ; CV = Cultures vivrières)



- une modification du système poral des horizons A11 et A12 qui se traduit par une double diminution du nombre et du diamètre des pores par rapport aux sols forestiers d'où une macroporosité plus faible. Toutefois, sur les sites 1 et 2 la couverture du sol au jeune âge (PSC) permet d'assurer une macroporosité nettement supérieure dans l'horizon A11 par rapport au sol maintenu nu au jeune âge. Cette baisse de la macroporosité affecte de manière moins importante les horizons profonds des sols cultivés par rapport aux sols forestiers.

Tableau IV. 1

Systèmes de cultures et compacité des horizons supérieurs

Horizons	PASSE CULTURAL		
	Forêt et Plantations forestières	Cultures vivrières	Palmeraie
A11, Ap	peu et très peu compact	peu et très peu compact	assez compact
A12	assez compact	assez compact à compact	très compact
A/B	compact	compact à très compact	très compact

1.1.2. Les sols sous cultures vivrières et sous plantations forestières

Les modifications morphologiques des sols sous cultures vivrières sur le site 1 se limitent à l'horizon travaillé Ap où on note une différenciation structurale liée au mode de cultures sur billons. Dans l'horizon Ap1 qui correspond au billon il apparaît une structure massive à 50 %; l'horizon Ap2 qui correspond à l'interbillon est plus compact que sous forêt.

Sur les sites 2 et 3, il n'apparaît pas de différences notables entre les profils forestiers et ceux sous cultures vivrières ou sous plantations forestières.

1.2. La densité apparente et la porosité totale

Les profils de densité apparente (Dap) font apparaître sur le site 2 peu de différences entre les situations culturales. Les valeurs les plus faibles se situent dans l'horizon humifère A11 avec un maximum dans l'horizon de pénétration humifère. A partir de l'horizon de pénétration humifère A12, il n'y a pratiquement plus de variation de la densité apparente en profondeur (fig. IV. 2).

Sur les sites 1 et 3 par contre, la différenciation est plus marquée entre les systèmes de culture dans l'horizon A11 où la forêt présente la valeur la plus faible. La densité apparente passe par un maximum dans tous les profils dans l'horizon de pénétration humifère avec des valeurs plus faibles sous forêt et plus élevées sous palmeraie sol nu au jeune âge (PSN). On note ensuite sur le site 1 une décroissance nette vers 40 cm de profondeur, suivie d'une légère augmentation progressive avec la profondeur. Les différences de Dap entre les systèmes de culture ne sont plus alors significatives.

Sur les sites 1 et 2, l'augmentation de la densité apparente liée au traitement PSN est supérieure à celle du traitement PSC.

La porosité totale calculée $(D_r - D_{ap})/D_r \times 100$ a été déduite des valeurs de la densité apparente et de la densité réelle (D_r). Dans les sols sous forêt, la porosité diminue avec la profondeur, elle passe de 55% à 40%. Cette observation peut être liée au caractère massif des horizons profonds. La faible porosité des horizons profonds ne semble pas être affectée par la mise en culture (tableau IV. 2). CHAUVEL (1977) a fait les mêmes observations en Casamance et en a conclu que la faible porosité des horizons dans les sols rouges de la Casamance était le résultat de l'évolution pédologique de ces sols.

Figure IV.2

Profils de densité apparente sous forêt (F) et sous différents systèmes de culture (PF = Plantation Forestière ; PSC et PSN = Palmeraie Sol Couvert ou Nu au jeune âge ; CV = Cultures Vivrières)

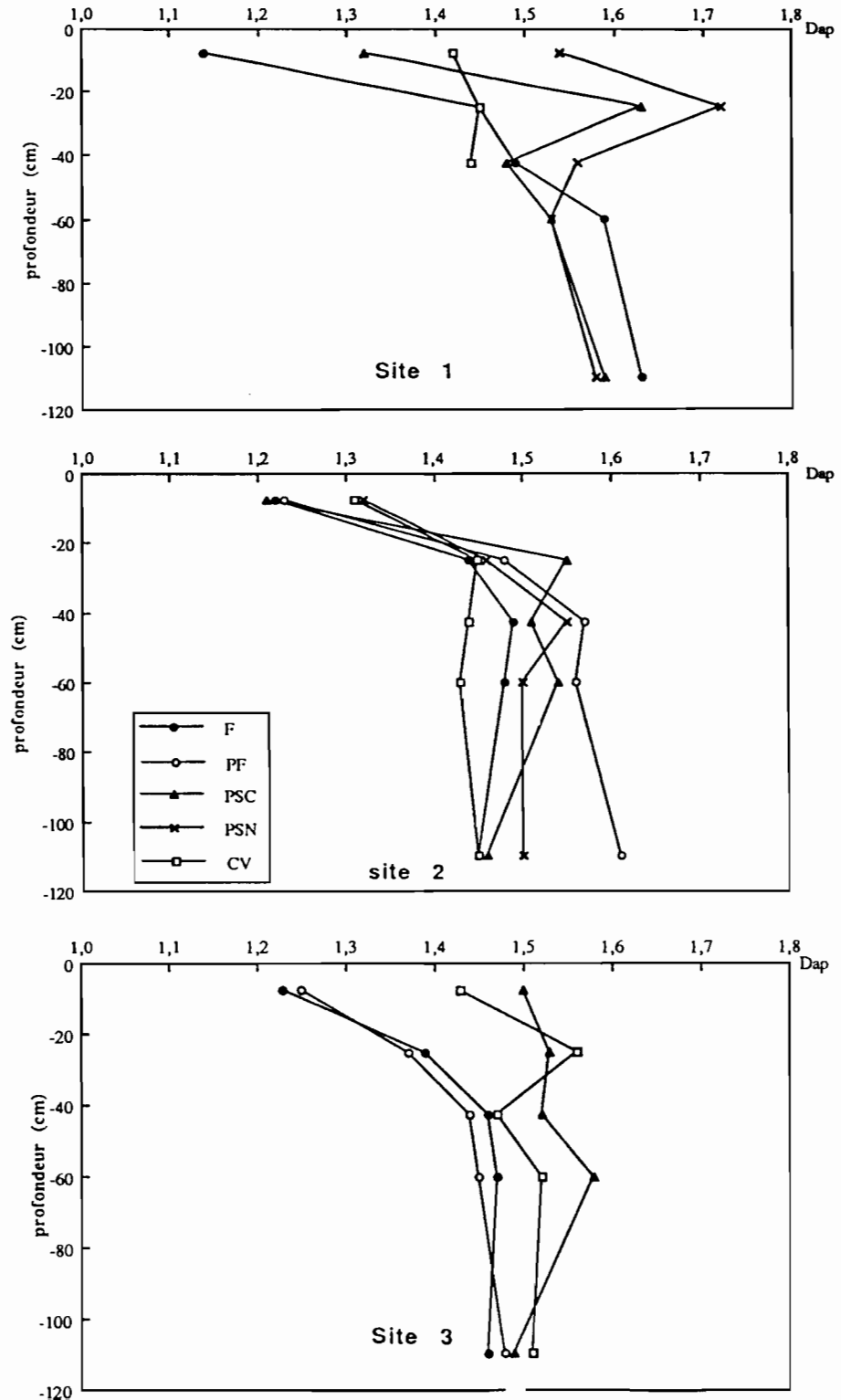


Tableau IV. 2
Porosité totale (%) calculée

Passé cultural		F	PF	PSC	PSN	CV
SITE 1	0-15 cm	57	-	49	40	46
	15-35 cm	44	-	37	37	44
	35-50 cm	42	-	42	40	45
SITE 2	0-15 cm	52	52	54	49	49
	15-35 cm	44	43	41	45	44
	35-50 cm	43	41	44	42	45
SITE 3	0-15 cm	53	52	42	-	45
	15-35 cm	47	47	41	-	40
	35-50 cm	44	45	42	-	44

F : Forêt PF : Plantation Forestière CV : Culture Vivrière
PSC : Palmeraie Sol Couvert au jeune âge PSN : Palmeraie Sol Nu au jeune âge

L'influence des systèmes de culture sur la porosité n'est manifeste que dans l'horizon Ap sur le site 1 où la porosité totale est de 57 % sous forêt et de 40 % sous PSN. Il semble donc que l'influence de la mise en culture soit moindre sur la porosité totale que sur la seule macroporosité (observations morphologiques).

Les conséquences de cette baisse de la porosité sur les propriétés telles que la perméabilité, l'aération et la sensibilité du sol à l'érosion sont évidentes. Pour vérifier ces observations morphologiques et ces données, nous avons effectué des examens de lames minces après imprégnation à la résine de blocs de sols non remaniés. Les caractères microstructuraux des trois horizons supérieurs sont résumés sur les planches en annexes IV.1.

L'observation des lames minces ne révèle pas de différence significative entre les différentes situations culturales en ce qui concerne les microstructures. Par contre, les

microorganisations se différencient nettement avec la profondeur. Cette différenciation se traduit surtout par :

- un envahissement croissant de la phase plasmique,
- une intensification des liaisons plasma-squelette,
- une diminution de la macroporosité et des modifications dans la forme et la taille des vides.

1.3. Relation entre la densité apparente, la teneur en éléments fins et la teneur en carbone

Dans les horizons superficiels plus marqués par les modifications physiques, il existe une corrélation négative mais non significative entre d'une part, la densité apparente et, d'autre part, la teneur en carbone ($r = - 0.82$ sous forêt et $- 0.61$ sous palmeraie). Par contre, entre la densité apparente et la teneur en éléments fins (argiles et limons fins), la corrélation est positive et non significative ($r = 0.49$ sous forêt et 0.55 sous palmeraie). En d'autres termes , plus la teneur en matière organique de ces sols est élevée, plus la densité apparente est faible. Cependant, dans les sols cultivés dont les teneurs en matières organiques sont plus faibles, le rôle des éléments fins semble devenir plus prépondérant que les teneurs en matières organiques.

1.4. Conclusion

La concentration relative de la matière organique dans les horizons humifères sous forêt et la forte activité biologique qui s'y développe à cause des conditions de température et d'humidité moins contrastées constituent donc autant de facteurs qui favorisent l'allègement et la diminution de la cohésion des horizons humifères. Sous forêt dans les horizons plus profonds, du fait de la faible activité biologique, la structure est plus massive et la porosité plus faible; le sol se compacte par tassement sur lui-même et la densité apparente est plus élevée.

La formation d'un horizon supérieur plus dense dans les sols cultivés avec les contraintes qui en résultent pour le développement du système racinaire et la circulation de l'eau, peut

être attribuée à la baisse de la teneur de cet horizon en matière organique consécutive à la mise en culture, mais aussi à des influences anthropiques. Le défrichement et le travail du sol, les modifications du pédoclimat qui en découlent, le passage régulier des engins et personnels d'entretien et de récolte et la diminution de restitutions organiques favorisent le tassement du sol. L'influence de ces facteurs est plus importante sur le site 1 où la mécanisation ne se limite pas au seul travail du sol. Le passage du système forestier aux sols cultivés se traduit par une baisse de la porosité qui tend dans le cas des sols sous palmeraie sur le site 1 vers des valeurs qui sont à la limite de l'admissible et qui gênent le développement satisfaisant des systèmes racinaires.

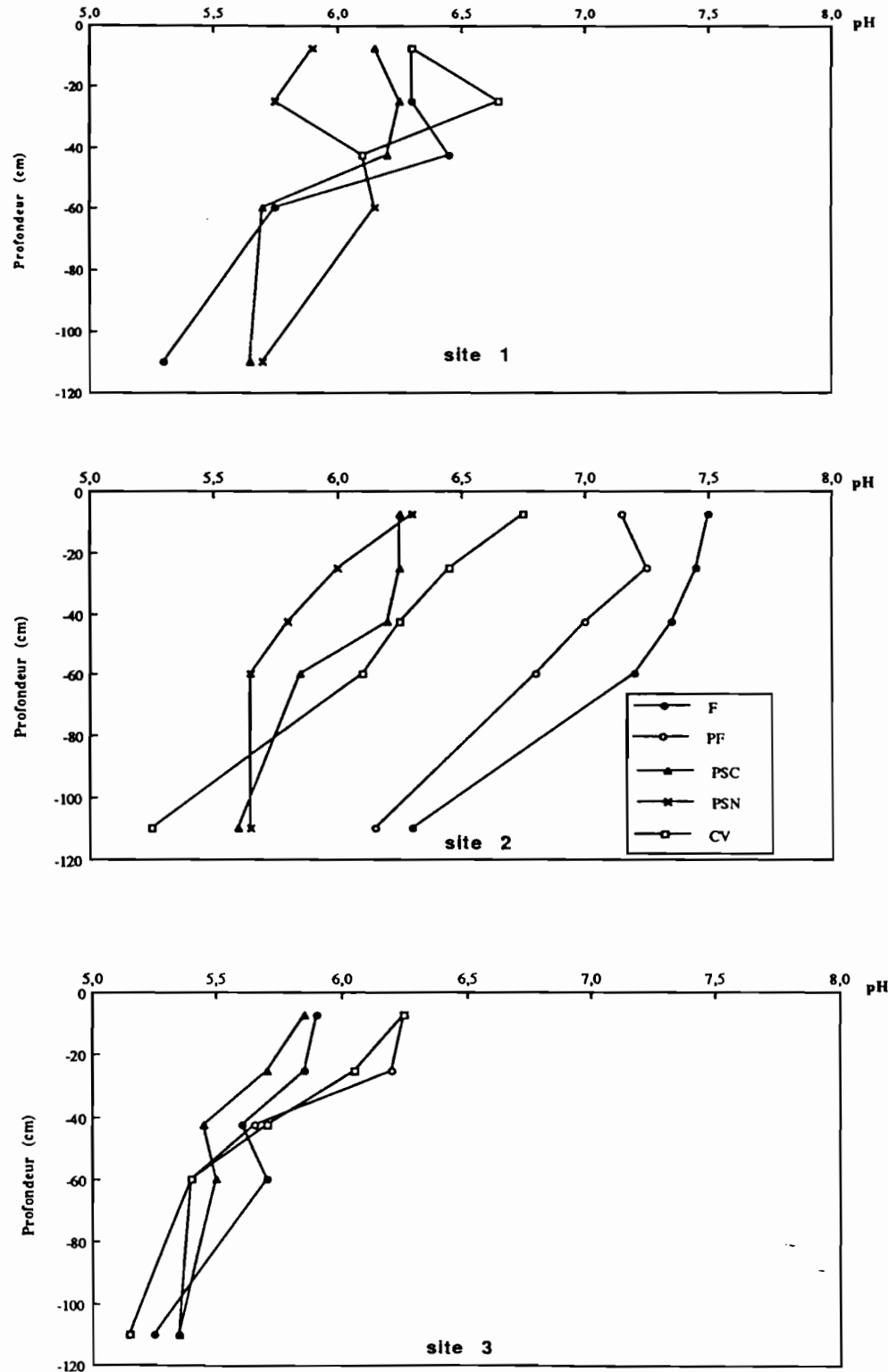
2. CARACTERES CHIMIQUES

Dans les sols forestiers, les pH sont supérieurs (site 2) ou proches (site 1) de la neutralité. Sur le site 3 par contre, les pH sont nettement plus faibles. Le pH diminue en fonction de la profondeur (fig. IV. 3). Dans les sols cultivés, la baisse du pH n'est importante que sur les sites 1 et 2, et plus particulièrement sur les parcelles sous palmiers qui ont été conduites en sol nu au jeune âge (PSN). Cependant les valeurs observées dans ces parcelles n'atteignent, sur aucun des sites, des limites inquiétantes comme celles signalées par ailleurs au Sénégal (FAUCK *et al.*, 1969) et au Bénin (DJEGUI, 1982).

La diminution de la somme des bases échangeables paraît plus préoccupante (annexe IV.2) dans les horizons humifères et de pénétration humifère sur les sites 1 et 3 et sur l'ensemble des profils sur le site 2. Sous palmeraie, cette diminution des bases échangeables est plus marquée lorsque le sol est maintenu nu au jeune âge (PSN). Dans l'horizon humifère superficiel, la somme des bases échangeables ne représente plus que 36 et 17 % de celle du sol forestier sur le site 1, et 34 et 27 % sur le site 2, respectivement sous palmeraie sol couvert et sous palmeraie sol nu. La plantation d'essences forestières permet de relever les teneurs en bases échangeables de ces horizons, mais elles demeurent nettement en dessous du niveau observé dans les sols forestiers .

Figure IV.3

Profils de pH sous forêt (F) et sous différents systèmes de cultures (PF = Plantations Forestières ; PSC et PSN = Palmeraie Sol Couvert ou Nu au jeune âge ; CV = Cultures Vivrières)



Cette évolution résulte surtout de la baisse des teneurs en calcium et en magnésium qui représentent en moyenne respectivement 70 % et 20 % de la somme des bases échangeables. La chute importante des teneurs en calcium et en magnésium expliquent les faibles valeurs de pH observées ci - dessus dans les plantations de palmiers. Le potassium échangeable dans les sols cultivés représente moins de 3 % de la somme des bases échangeables et les teneurs se stabilisent à des teneurs très faibles autour de 0,02 et 0,04 cmol. kg⁻¹.

3. CONCLUSION

Les calculs de corrélation indiquent que les modifications des caractéristiques physiques (densité apparente et porosité) d'une part, les bases échangeables d'autre part sont essentiellement liées aux variations des teneurs en matière organique, aussi bien dans les parcelles sous végétation naturelle forestière que dans les sols cultivés. L'évolution sous culture de ces sols pose donc deux problèmes préoccupants :

- la baisse de la porosité,
- la diminution du stock de bases échangeables.

L'un et l'autre des deux problèmes étant liés au statut organique des horizons affectés par ces transformations, nous étudierons dans le chapitre suivant l'évolution de la matière organique dans ces sols cultivés.

CHAPITRE V

HETEROGENEITE SPATIALE DANS LES PARCELLES DE PALMIERS ET DE CULTURES VIVRIERES : ASPECTS METHODOLOGIQUES

1. EFFET DES PRATIQUES CULTURALES SUR LA VARIABILITE SPATIALE DANS LES PARCELLES DE PALMIERS A HUILE ET CULTURES VIVRIERES

Dans le chapitre III, nous avons indiqué que les restitutions des palmes d'élagage dans les andains, le désherbage et l'application des engrais dans les "ronds" autour des arbres entraînent une variabilité spatiale importante dans les palmeraies. Nous avons conclu que la parcelle de palmiers peut être divisée en trois zones distinctes du point de vue de l'évolution des sols: les interlignes, les andains et les "ronds". Cette hétérogénéité ne se limite pas seulement aux restitutions organiques. Elle concerne également le système racinaire. Le palmier à huile a en effet un système racinaire puissant qui comprend :

- des racines primaires et secondaires lignifiées sur toute leur longueur et dont la capacité d'adsorption de l'eau et des éléments minéraux est limitée,
- des racines tertiaires et quaternaires peu lignifiées, dont le rythme de renouvellement est plus rapide et qui assurent pour l'essentiel l'alimentation hydrique et minérale du palmier.

L'évaluation quantitative des racines sur le site 2 indique que la densité des racines tertiaires et quaternaires est plus importante à 2.25 m de l'arbre qu'à 4.5 m de l'arbre. En d'autres termes les racines tertiaires et quaternaires sont plus abondantes dans les "ronds" que dans les interlignes. De plus, 60 % des racines sont concentrées dans les dix

premiers centimètres du sol (tableaux V.1 et 2). Aucune observation quantitative des racines n'a pu être faite sous les andains. Cependant, on peut noter sous les tas de palmes un feutrage superficiel assez dense de racines tertiaires et quaternaires qui distingue cette zone des deux autres.

Dans les parcelles sous cultures vivrières, nous avons identifié deux sous - ensembles : le billon et l'interbillon.

Tableau V.1

Masse des racines tertiaires et quaternaires du Palmier à huile sur un profil de 210cm sur le site 2 (Akpadanou)

	Distance de l'arbre	
	2,25 m de l'arbre	4,5 m de l'arbre
Masse totale des racines (g)	11,242	9,644
Densité racinaire (g/cm ³)	1,274	1,093

Tableau V.2

Evolution dans le profil des racines tertiaires et quaternaires (% de la masse totale des racines) sur le site 2 (Akpadanou)

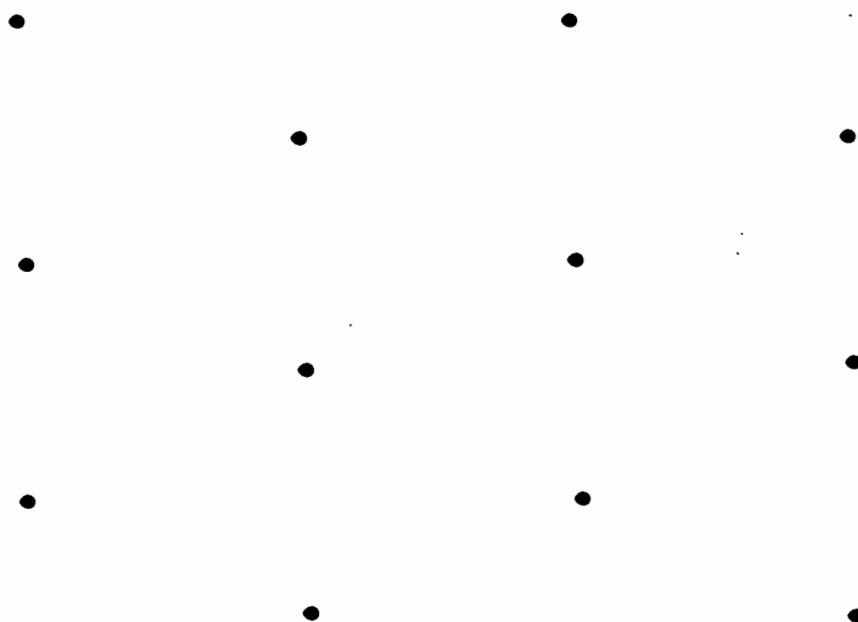
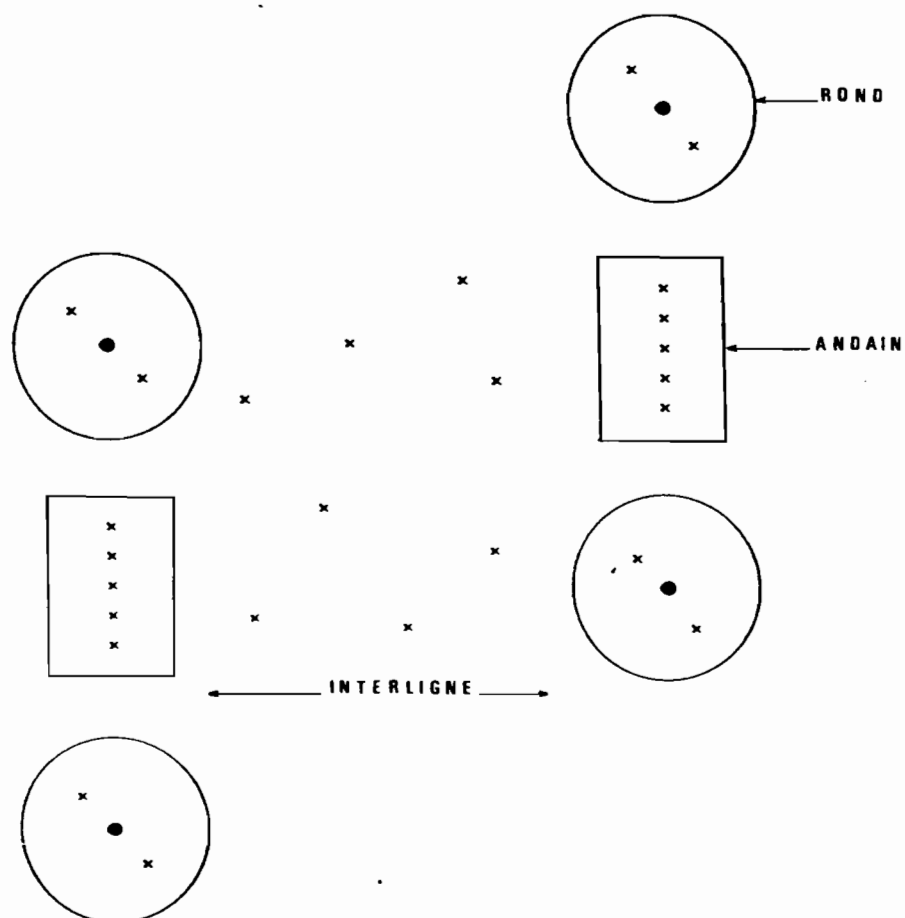
SITE 2 (AKPADANOU)	Distance de l'arbre	
	2,25 m de l'arbre	4,5 m de l'arbre
0 - 60 cm	52,9	52,8
75 - 150 cm	20,0	20,7
165 - 210 cm	5,8	6,5

2. PLAN D'ECHANTILLONNAGE

La variabilité spatiale des teneurs en carbone et en azote a été étudiée dans le détail sur le site 3. Pour ce faire, nous avons réalisé un échantillonnage raisonné dans le cadre d'une "maille élémentaire". Celle-ci est définie comme l'espace compris entre quatre palmiers sains, et comprenant deux andains, un interligne et quatre "ronds" autour des palmiers (figures V.1a et b). Les prélèvements composites ont été constitués par 5 prélèvements élémentaires par horizon sous chacun des andains, (soit au total 10 prélèvements élémentaires) 8 prélèvements élémentaires par horizon pour les ronds (2 par rond) et 8 par horizon pour l'interligne. Les profondeurs de prélèvement sont: 0-15, 15-35, 35-50, 50-70 et 100-120 cm. Le nombre de répétitions, ou mailles élémentaires, est de quatre.

Pour la parcelle sous cultures vivrières, deux échantillons composites séparés ont été constitués à l'aide de 5 prélèvements élémentaires dans le sous ensemble billon et 5 prélèvements élémentaires dans l'interbillon. Le nombre de répétitions est de quatre.

Les échantillons ont été séchés à l'air pendant plusieurs jours, puis passés en force à travers un tamis de 2 mm. La fraction supérieure à 2 mm peu importante n'est pas conservée. Pour le dosage du carbone et de l'azote des fractions aliquotes sont broyées finement (inférieur à 150 μm)

Figure V.1a*Représentation schématique d'une parcelle de palmiers***Figure V.1b***Représentation schématique de la maille élémentaire*

3. METHODES D'ANALYSE ET DE CALCUL

Le carbone a été dosé par voie sèche à l'aide d'un analyseur élémentaire CHN LECO et l'azote par la méthode KJELDAHL.

Le stock (Q en kg/m²) de carbone ou d'azote contenu dans un horizon d'épaisseur e (cm) est obtenu par la formule suivante: $Q = C \times e \times Dap / 100$ dans laquelle Dap est la densité apparente et C les teneurs en carbone ou en azote exprimées en mg/g de sol.

4. RESULTATS ET DISCUSSIONS

4.1. Répartition des teneurs en carbone et en azote dans les parcelles de palmiers à huile et de cultures vivrières

La répartition du carbone et de l'azote sous palmeraie dans les différentes zones homogènes définies ci-dessus sont représentées sur les figures V.2 et V.3 et sont détaillées en annexe (annexes V.1 et V.2). L'influence des pratiques culturales est significative sur les 35 cm supérieurs (pour le carbone) et 15 cm supérieurs (pour l'azote) sous les andains, dans les "ronds" et dans l'interligne. Dans les deux horizons supérieurs (0 - 15 cm et 15 - 35 cm), les teneurs en carbone et en azote sont beaucoup plus élevées sous les andains qu'au niveau des "ronds" et des interlignes.

Dans les parcelles de cultures vivrières, les teneurs en matière organique de l'horizon superficiel sous le billon et dans l'interbillon ne sont pas différentes. Par contre, la terre rassemblée dans les billons présente des teneurs en carbone et en azote nettement plus élevées.(annexe V. 3 ; figures V.4 et 5).

Cette hétérogénéité spatiale liée à la présence du palmier à huile a été observée par KANG (1977) au Nigéria dans le cas des jachères dans lesquelles les palmiers à huile ne sont pas abattus. Dans les parcelles que nous avons étudiées, les teneurs en matière organique sous andains illustrent localement l'influence des restitutions végétales sur le statut organique des sols. Les estimations effectuées par HARTMANN (1991) en Côte-d'Ivoire indiquent que ces apports locaux concernent des quantités de biomasse végétale assez

Figure V.2

Profils des teneurs en carbone (%) sous andains dans l'interligne et dans les "ronds" dans une parcelle de palmiers à huile (site 3)

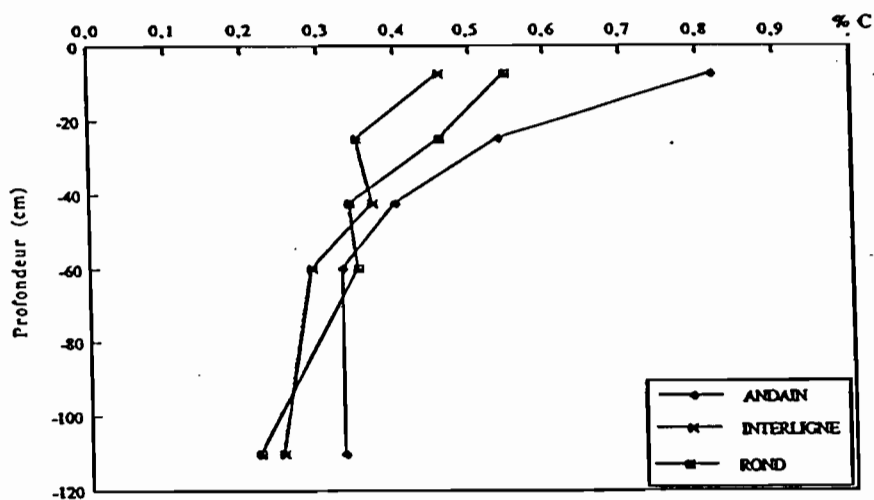


Figure V.3

Profils des teneurs en azote (mg/g sol) sous andains dans l'interligne et dans les "ronds" dans une parcelle de palmiers à huile (site 3)

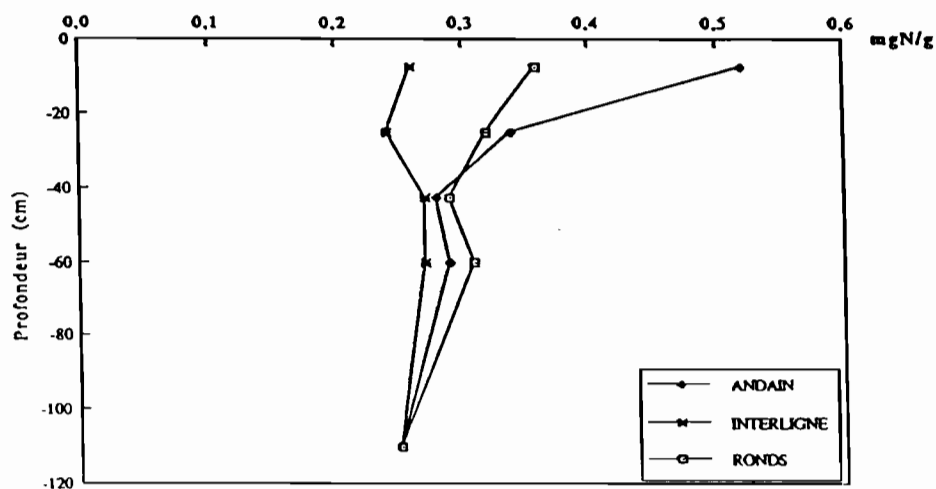


Figure V.4

Profils des teneurs en carbone (%) sous billon et dans l'interbillon dans une parcelle de cultures vivrières (site 3)

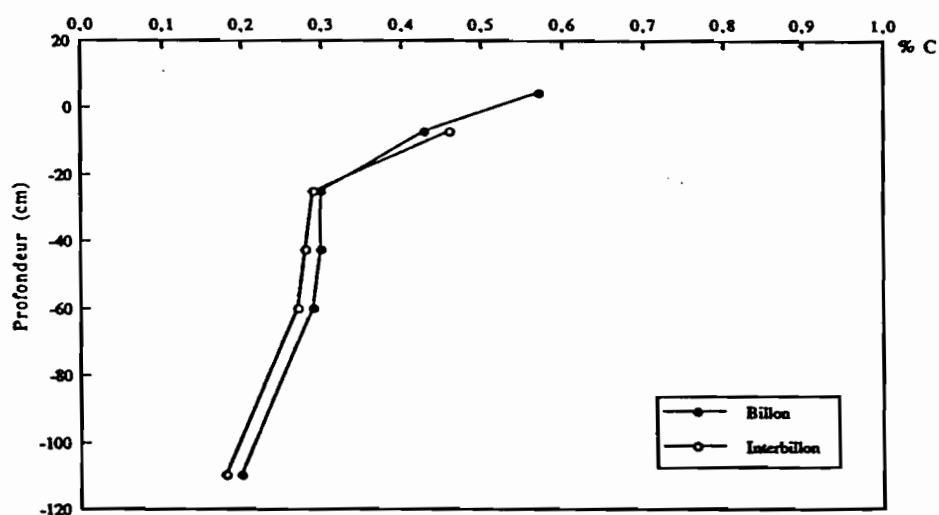
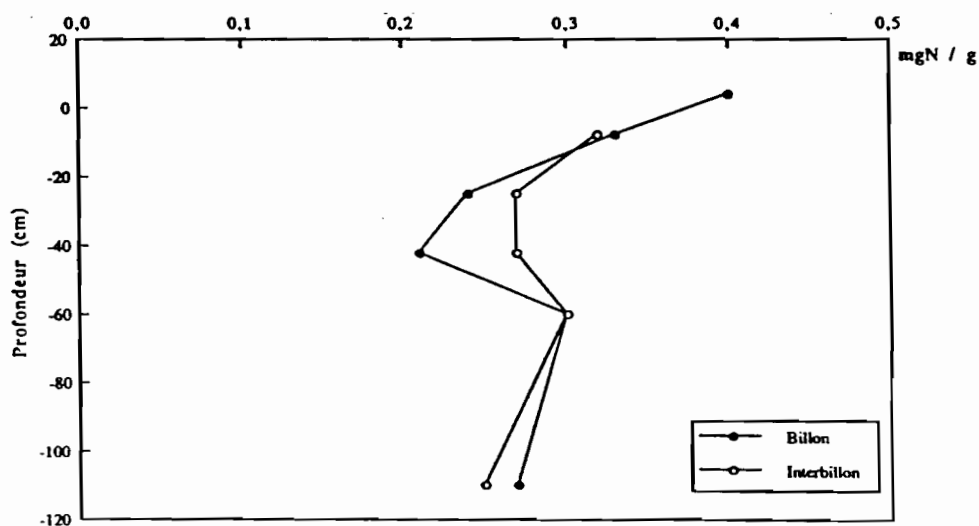


Figure V.5

Profils des teneurs en azote (mg N/g sol) sous billon et dans l'interbillon dans une parcelle de cultures vivrières (site 3)



importantes, environ 10 t MS/ ha/an et localisées, qui plus est, sur 25 % des surfaces. Dans les conditions du Bénin où le déficit hydrique plus important limite le développement végétatif, il faut noter que les quantités restituées doivent être plus faibles. Elles restent cependant voisines des apports annuels de litière dans les écosystèmes forestiers qui ont été évalués par SOKPON et LEJOLY (1991) au Bénin à 9,4 t/ha. Cependant les teneurs en matière organique des sols sous andains restent inférieures à celles de la parcelle forestière (cf ci-après Tableau VI.1a). L'entassement des feuilles d'élagage dans les andains, leur faible contact avec le sol minéral et leur décomposition aérienne semblent limiter les possibilités d'incorporation (surtout par les termites) et de stabilisation des produits issus de la biodégradation des résidus organiques. Il semble en effet que la stabilité de la matière organique du sol dépende plus de la formation de complexes organominéraux que de la nature chimique difficilement minéralisable des résidus végétaux (DUXBURY *et al.*, 1989).

Dans la parcelle de cultures vivrières, l'alternance des billons, déplacés chaque année a favorisé l'homogénéisation des teneurs en carbone et en azote sous les billons et dans l'interbillon. On note toutefois que le billon (de l'année) est plus riche en C et N que l'interbillon et l'horizon sous-jacent. Au delà de l'enrichissement par quelques résidus de cultures, les billons sont constitués par des mottes de terre superficielles (0-5 à 0-10 cm) qui doivent être un peu plus riches en matières organiques que la couche (0-15 cm) du sol de l'interbillon.

4.2. Comparaison des stocks organiques sous palmiers et sous cultures vivrières

En intégrant les données relatives à la teneur, à la densité apparente et à la superficie relative de chaque sous-ensemble, on obtient les stocks de matière organique qui figurent au tableau V. 3. Deux conclusions s'imposent :

- en tenant compte des andains et des ronds, les stocks de carbone et d'azote contenus dans les horizons superficiels de l'ensemble de la parcelle sous palmier sont majorés d'environ 15% par rapport à l'estimation faite dans les interlignes (comparer par

exemple, pour le C, et sous PSC, le total 2,42 à l'estimation réalisée dans l'interligne 2,11).

- après une vingtaine d'années de cultures, les stocks moyens de carbone et d'azote dans les 35 premiers cm des sols sont à peu près identiques dans les parcelles sous palmiers à huile et sous cultures vivrières continues.

Tableau V.3

*Stocks organiques dans une parcelle de palmiers à huile et de cultures vivrières
sur le site 3 (Ouidah)*

Système de cultures	ZONES	CARBONE			AZOTE		
		mg/g sol	kg/m ² dans chaque zone	kg/m ² dans la parcelle élémentaire	mg/g sol	kg/m ² dans chaque zone	kg/m ² dans la parcelle élémentaire
P S C 0 - 35 cm	Andains	6,5	3,01	0,76	0,41	0,191 0	0,048
	Ronds	5,0	2,65	0,40	0,34	0,179 0	0,027
	Interligne	4,0	2,11	1,26	0,25	0,132 1	0,079
	TOTAL			2,42			0,154
C V 0 - 40 cm	Billons	3,9	2,51	1,50	0,27	0,170	0,11
	Interbillons	3,7	1,89	0,76	0,24	0,150	0,06
	TOTAL			2,26			0,170

PSC : Palmeraie Sol Couvert au jeune âge

CV : Cultures Vivrières

5. CONCLUSION

Il existe donc une forte hétérogénéité spatiale des teneurs en matière organique à mettre en relation :

- avec les façons culturales propres aux cultures vivrières conduites en billons,
- avec le mode de plantation en lignes et la restitution en andains des matières végétales résultant de l'élagage des palmiers à huile qui entraînent un développement différent des systèmes racinaires sous les "ronds" autour des arbres, sous les andains et dans les interlignes.

La quantification du statut organique des sols doit donc s'appuyer sur un échantillonnage raisonné des volumes de sol identifiés au préalable au sein des parcelles et sur des profils culturaux (pour la profondeur) représentatifs de différentes zones différenciées par les techniques culturales.

Cependant, sur les sites 1 et 2, l'exportation de la plus grande partie des palmes comme bois de cuisine fait que les andains sous palmeraie sont localement très limités voire inexistants, ce dernier cas étant très fréquent. Pour comparer les stocks de matière organique dans ces parcelles sous palmiers à huile et dans les différents sites, nous avons donc été conduit à évaluer les stocks organiques en considérant seulement les interlignes qui occupent la majeure partie des parcelles et qui ne sont pas influencés par l'exportation partielle ou totale de ces résidus de cultures. Lorsque toutes les palmes sont entassées dans les andains, les estimations des stocks de carbone (0-35 cm) des parcelles doivent donc être majorées d'environ 15 % par rapport aux stocks mesurés dans les interlignes.

Le chapitre suivant compare sur chaque site les stocks de carbone et d'azote sous forêt et sous les différents systèmes de culture.

CHAPITRE VI

REPARTITIONS DU CARBONE ET DE L'AZOTE DANS LES PROFILS. RELATION AVEC LE PROFIL TEXTURAL

1. METHODOLOGIE

Dans chaque parcelle, une microparcelle représentative de 20 m x 20 m a été matérialisée autour de la fosse d'observation du profil cultural dans les interlignes. Pour les parcelles de cultures vivrières, les prélèvements ont été réalisés dans les billons.

Les échantillons composites ont été constitués à partir de 40 prélèvements élémentaires effectués à la tarière dans les microparcelles aux profondeurs suivantes : 0-15 ; 15-35 ; 35-50 ; 50-70 et 100-120 cm.

La préparation des échantillons, leur conditionnement et les dosages de carbone et d'azote ont été réalisés dans les mêmes conditions qu'au chapitre précédent (Chapitre V).

2. RESUTATS ET DISCUSSIONS

2.1 Répartition du carbone et de l'azote dans les profils

Sous végétation naturelle forestière, les teneurs en C et en N dans l'horizon humifère de surface sont plus élevées sur le site 1 que sur les deux autres sites (figure VI. 1 a,b). Rappelons aussi que la pluviométrie et la teneur en éléments fins des sols diminuent du site 1 aux sites 2 et 3. Les teneurs en matière organique diminuent lentement dans l'horizon AB et un léger ventre d'accumulation du carbone et de l'azote semble apparaître vers 60 cm sur les sites 1 et 3.

Figure VI.1a

Profils de teneurs en carbone (%) sous forêt (F) et sous différents systèmes de cultures (PF = Plantation Forestière ; PSC et PSN = Palmeraie Sol Couvert ou Nu au jeune âge ; CV = Cultures Vivrières)

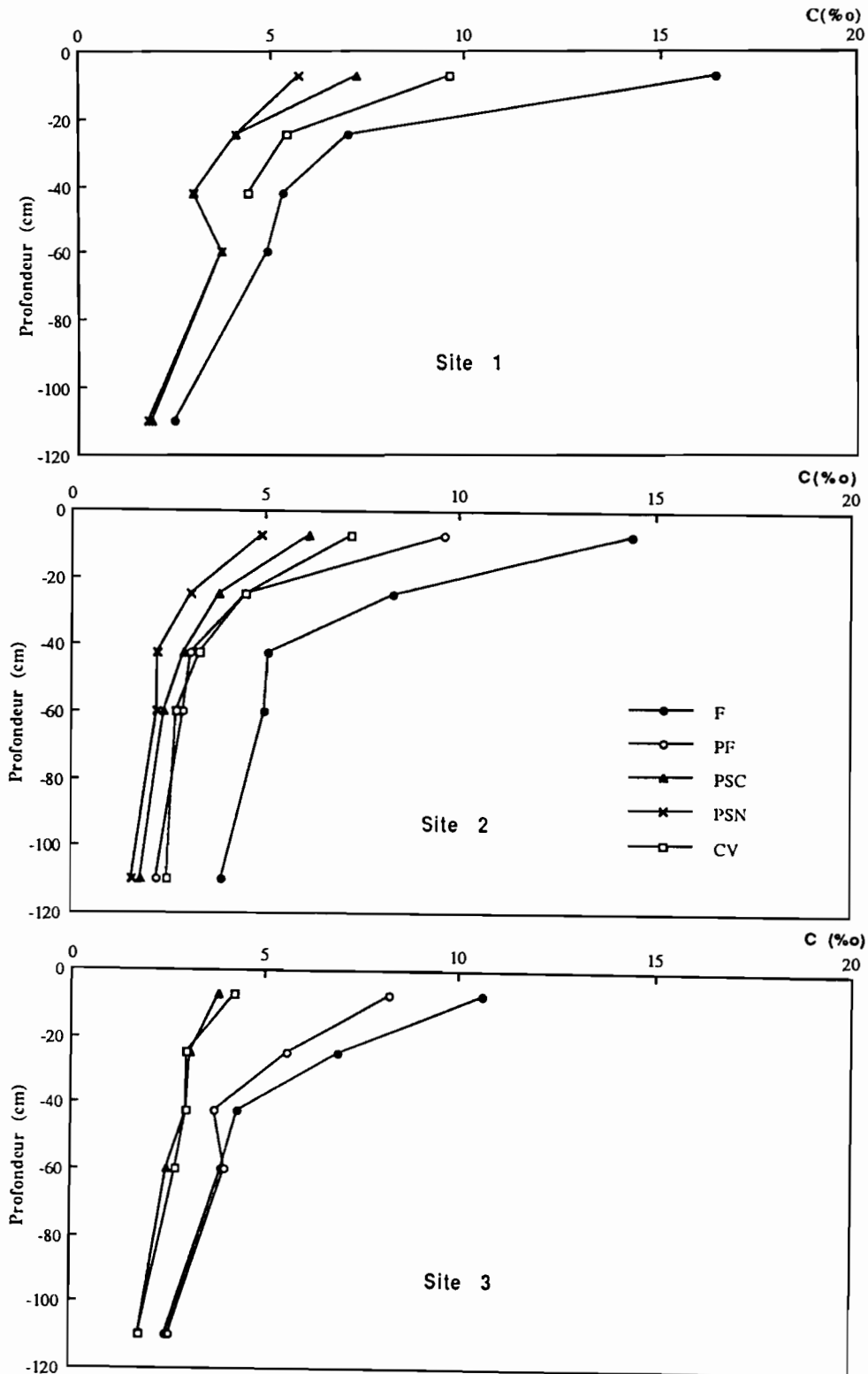
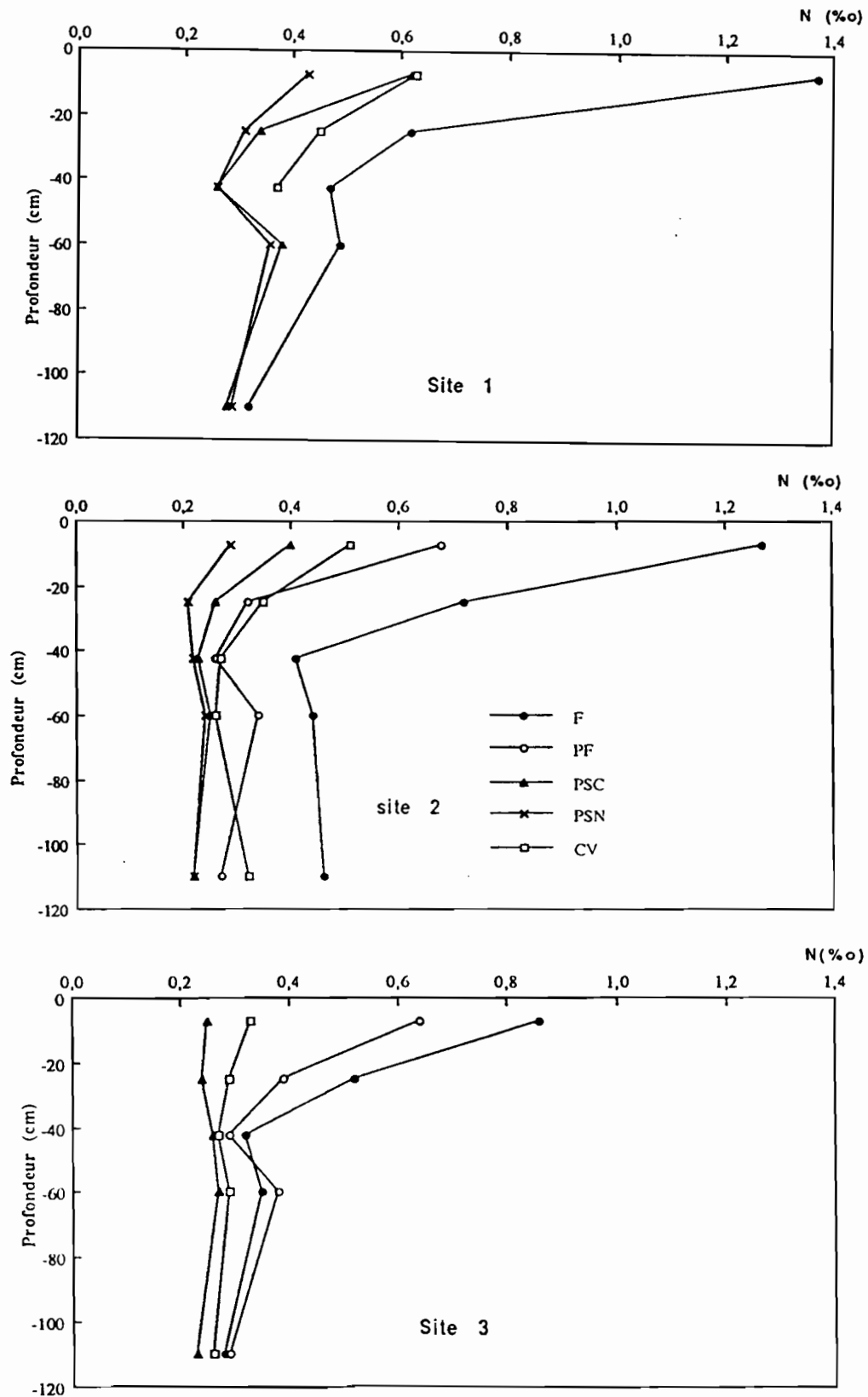


Figure VI.1b

Profils de teneurs en azote (‰) sous forêt (F) et sous différents systèmes de cultures (PF = Plantation Forestière ; PSC et PSN = Palmeraie Sol Couvert ou Nu au jeune âge ; CV = Cultures Vivrières)



Sur les trois sites, les teneurs en C et N dans les horizons superficiels des sols cultivés varient dans le sens $F > PF > CV > PSC > PSN$. Sur les sites 1 et 3 les différences entre parcelles sous forêt et parcelles sous culture s'amenuisent à partir de 50/60 cm et les teneurs deviennent très voisines. Sur le site 2 par contre, la baisse des teneurs en C et en N dans les sols cultivés affecte non seulement les horizons superficiels mais aussi les horizons en profondeur.

L'effet du mode de couverture du sol sur les teneurs en carbone et en azote des sols sous palmiers à huile s'exprime uniquement sur les 20 centimètres supérieurs avec des teneurs en C et N sensiblement plus élevées pour les parcelles avec plantes de couverture au jeune âge (PSC) par rapport à celles en sol nu (PSN) (+ 45 % de N et + 25 % de C par rapport à PSN). Ces observations confirment celles qui avaient été faites antérieurement par DANIEL (1986).

2.2. Les stocks organiques

2.2.1. *Evaluation des stocks organiques dans les profils étudiés*

Pour comparer les sols sous forêt, plantes annuelles et plantes pérennes, il convient d'intégrer l'ensemble des horizons humifères pour rendre compte des différences importantes dues au travail du sol, au développement des systèmes racinaires et à la pénétration humifère suivant les systèmes de culture. Il nous est donc paru nécessaire d'étudier les quantités pondérales de matière organique présentes dans l'ensemble du profil. D'autre part, la mise en culture provoque aussi une différenciation profonde de la morphologie et surtout de la densité apparente des horizons supérieurs en fonction du mode d'utilisation des parcelles (chapitre IV). En cumulant ces différents paramètres, nous avons évalué, pour chaque système de culture, les stocks cumulés de C et de N sur les 35 ou 70 premiers centimètres du sol (tableau VI. 1 a et b).

Tableau VI.1a : Stocks organiques (kgC/m^2) dans les 35 et 70 cm superficiels du sol

	SITE 1 : POBE		SITE 2 : AKPADANOU		SITE 3 : OUIDAH	
	0-35 cm	0-70 cm	0-35 cm	0-70 cm	0-35 cm	0-70 cm
Forêt	4,83	7,57	5,03	7,65	3,75	5,84
PF	-	-	3,10	4,73	3,04	5,00
PSC	2,77	4,56	2,27	3,66	1,84	3,37
PSN	2,73	4,56	1,86	3,02	-	-
CV	2,99	-	2,70	4,21	2,70	4,21
Indice de variation relative	de 38 à 44 %		de 46 à 63 %		de 28 à 51 %	

Tableau VI.1b : Stocks organiques (kgN/m^2) dans les 35 et 70 cm superficiels du sol

	SITE 1 : POBE		SITE 2 : AKPADANOU		SITE 3 : OUIDAH	
	0-35 cm	0-70 cm	0-35 cm	0-70 cm	0-35 cm	0-70 cm
Forêt	0,41	0,68	0,44	0,66	0,30	0,47
PF	-	-	0,22	0,39	0,23	0,40
PSC	0,23	0,41	0,15	0,30	0,13	0,28
PSN	0,21	0,38	0,12	0,26	-	-
CV	0,26	-	0,20	0,35	0,16	0,31
Indice de variation relative	de 37 à 44 %		de 47 à 72 %		de 34 à 57 %	

F = Forêt ; PF = Plantation Forestière ; PSC = Palmeraie Sol Couvert ; PSN = Palmeraie Sol Nu
CV = Cultures Vivrières

Les indices de variations relatives (IVR) sont calculées par rapport aux stocks de C et N mesurés dans les sols forestiers : $\text{IVR} = \frac{Q(\text{F}) - Q(\text{culture})}{Q(\text{F})} \times 100$

L'analyse de ces tableaux permet de tirer les conclusions suivantes :

- a) la couche 0 à 35 cm renferme plus de 60 à 70% des stocks organiques contenus dans les 70 premiers cm du sol,
- b) les indices de variation des stocks organiques dans les sols cultivés par rapport aux stocks mesurés dans les sols forestiers indiquent un appauvrissement relatif plus important de l'ensemble des horizons sur le site 2. Le défrichement et les différents systèmes de culture conduisent à une diminution de l'ordre de 50 % des stocks organiques contenues dans ces sols.
- c) Du point de vue des stocks organiques, les systèmes de culture se rangent dans le même ordre qu'en comparant les teneurs des horizons superficiels. Cependant les différences sont plus atténuées du fait de l'augmentation de la densité apparente des horizons supérieurs des sols cultivés.

2.2.2. Relation entre profil textural et profil organique

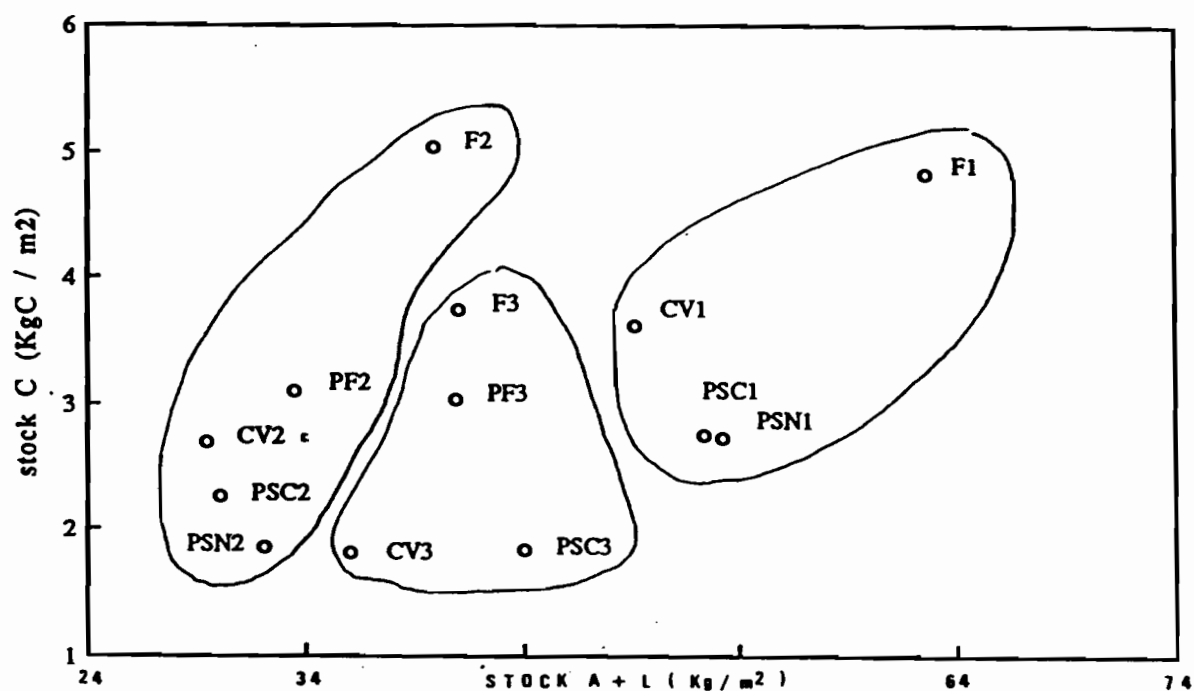
La corrélation entre le stock d'éléments fins (argile + limons fins) et le stock de matière organique dans la couche 0-35 cm n'est pas significative ($r = 0,47$). Cependant sur le site 1, la diminution des stocks organiques dans les sols cultivés par rapport au sol forestier est plus faible que sur les deux autres sites (figure VI. 2). La richesse en éléments fins un peu plus grande sur ce site a favorisé une certaine stabilisation des matières organiques à un niveau d'équilibre dynamique relativement élevé (MARTIN et HAIDER, 1986). De plus, l'accroissement brutal des teneurs en argile dans les profils entre 40 et 60 cm et plus particulièrement sur le site 1, s'accompagne d'une légère illuviation de carbone, et surtout d'azote en profondeur.

Le fractionnement granulométrique de cet horizon AB, suivant la méthodologie retenue au chapitre X, indique que malgré le traitement aux ultrasons, la plus grosse partie de l'argile se trouve répartie dans des macroagrégats relativement stables (annexe VI.1). Ces macroagrégats sont également responsables du stockage de la moitié du carbone de cet horizon de pénétration humifère. Toutefois, les teneurs en azote stockées sont très limitées. Il s'agit donc probablement de débris organiques d'origine racinaire fragmentés et séquestrés par l'argile contenue dans ces pseudosables. La décomposition de ces matières organiques piégées dans des pseudosables est freinée parce qu'elles sont peu

accessibles aux microorganismes et aux enzymes contenues dans la solution du sol qui circule dans la macroporosité.

Figure VI.2

Relation entre stocks d'éléments fins et stocks de carbone dans les 35 cm superficiels du sol



Stocks sous forêt (F) et sous différents systèmes de cultures : plantation forestière (PF), Palmeraie Sol Couvert (PSC) ou sol Nu (PSN) au jeune âge et sous Cultures Vivrières (CV). Les chiffres (1, 2 et 3) correspondent aux trois sites étudiés

3. CONCLUSION

Ces comparaisons des stocks de carbone et d'azote organique montrent une forte diminution des matières organiques sous culture et principalement dans les interlignes des plantations de palmiers à huile.

Du point de vue de l'alimentation en eau, du développement végétatif et de la précocité de la production des palmiers, il a été montré, pour les premières années de plantation, que la technique du sol nu est supérieure au sol couvert au jeune âge au Bénin (BENARD et DANIEL, 1971). Nous manquons de données pour les années ultérieures. Cependant, sous PSN, le travail régulier du sol et la moins bonne protection des sols contre l'agressivité des pluies favorisent la destruction des agrégats et pourraient augmenter les risques d'érosion en nappe dont l'effet sur les stocks organiques est particulièrement important (ROOSE, 1970). Nous avons du reste noté des teneurs plus faibles en argile dans la couche (0-15 cm) sous PSN (5.9 et 3.7 % sur les sites 1 et 2) que sous PSC (7.5 et 4.1 % sur les sites 1 et 2). De plus, les variations plus importantes de la température du sol superficiel favorisent également la minéralisation des matières organiques.

Ces observations pourraient expliquer les teneurs et stocks en C et N plus faibles pour les parcelles PSN que PSC. Cette différenciation se serait faite dès les premières années de plantation.

Pour les cultures vivrières, les restitutions organiques dans les billons même si elles sont faibles permettent de maintenir les stocks organiques des parcelles de cultures vivrières à un niveau un peu plus élevé que dans les interlignes des parcelles sous palmiers.

Quels sont les effets de ces variations importantes de matière organique sur l'azote minéralisable ou utilisable par la plante et la nature des compartiments concernés? Ces questions sont abordées dans la troisième partie.

CHAPITRE VII

L'AZOTE POTENTIELLEMENT MINERALISABLE

1. INTRODUCTION

Il s'agit d'étudier ici l'effet des différents systèmes de cultures sur le potentiel de minéralisation de l'azote du sol et de tester, en particulier, les conséquences des variations des teneurs en matière organique. Pour mesurer les quantités d'azote potentiellement minéralisable du sol, notre choix s'est porté sur la méthode d'incubation-percolation décrite par STANFORD et SMITH (1972). Il s'agit d'une incubation à température et humidité constantes au cours de laquelle le sol est lessivé périodiquement avec une solution de CaCl_2 $M/100$ puis par une solution de recharge cationique. Les quantités d'azote mesurées à chaque percolation sont cumulées (N_t) puis N_t est ajusté suivant une cinétique de premier ordre:

$$N_t = N_o (1 - e^{-kt})$$

avec:

N_o = quantité maximum d'azote potentiellement minéralisable (mgN / kg de sol)

k = constante de vitesse de minéralisation de ce compartiment azoté du sol (semaine⁻¹)

t = temps d'incubation exprimé en semaines.

Les valeurs estimées de ces différents paramètres sont donc issues de l'ajustement de résultats expérimentaux obtenus en conditions contrôlées au laboratoire où l'on maîtrise entre autres facteurs la température et l'humidité du sol. Ces facteurs affectent de manière prépondérante la minéralisation de l'azote et leurs lois d'action ont été étudiées (MILLER et JOHNSON, 1964 ; STANFORD et EPSTEIN, 1974 ; CASSMAN et MUNNS,

1980). Le modèle ainsi défini n'est qu'une représentation partielle du comportement au champ puisque ces paramètres n'y sont pas constamment à leur optimum. Pour essayer de prédire la minéralisation au champ, les valeurs du potentiel de minéralisation (N_0) et de la constante de vitesse de minéralisation (k) obtenues à partir des incubations au laboratoire peuvent faire l'objet d'une correction en tenant compte de la température et de l'humidité au champ (STANFORD *et al.*, 1973; STANFORD et EPSTEIN, 1974)

Cette technique a été utilisée pour apprécier l'effet de différentes pratiques culturales (rotations, apport de fumures minérales ou d'amendements organiques) sur la fertilité azotée des sols (DORAN, 1980; CAMPBELL et SOUSTER, 1982; El HARIS *et al.*, 1983; GRIFFIN et LAINE, 1983) et pour caractériser le stock d'azote minéralisable en serre ou au champ (STANFORD *et al.*, 1973; STANFORD *et al.*, 1977; MARION *et al.*, 1981; MARY et REMY, 1979). Par contre, d'autres auteurs ont noté la surestimation du potentiel ainsi défini par rapport à la quantité d'azote organique minéralisé au champ (VERSTRASSE et VOETS, 1976; CABRERA et KISSEL, 1988).

Parmi les causes possibles de cette surestimation, les auteurs s'accordent pour citer le traitement des échantillons avant incubation (séchage et tamisage à 2 mm). Il a été en effet prouvé que le séchage du sol augmente la quantité d'azote minéralisée après réhumectation (BIRCH, 1960; AGARWAL, 1970; SENEVRATNE et WILD, 1985) et que la diminution de la taille des agrégats peut accroître la minéralisation de l'azote organique (CRASWELL et WARING, 1972; HIURA *et al.*, 1976). Les quantités d'azote impliquées dans l'extraminéralisation due à la préparation des échantillons sont importantes puisqu'elles représentent en valeur absolue de 25 à 69 % du stock potentiellement minéralisable (N_0) selon les types de sol considérés (VONG *et al.*).

Dans les cinétiques de minéralisation de l'azote au cours des incubations au laboratoire il existerait donc deux phases (MARY et REMY, 1979) :

- une phase correspondant à un régime transitoire qui dure à peu près deux semaines et qui correspond à la réaction du sol qui, réhumecté brutalement après séchage, tamisage et stockage de plus ou moins longue durée, entraîne une minéralisation des résidus organiques très labiles et particulièrement de la biomasse microbienne.

- une phase où s'établit un régime permanent au cours duquel la minéralisation de la matière organique humifiée prédomine.

Ces considérations ont amené certains auteurs à préconiser :

- l'élimination de l'extraminéralisation correspondant à la première phase dans l'estimation de N_o (VONG *et al.*, 1989),
- l'utilisation de modèles à double compartiment (MOLINA *et al.*, 1980; GRIFFIN et LAINE, 1983; DEANS *et al.*, 1986),
- l'utilisation d'échantillons non séchés; dans ce cas particulier, la minéralisation de l'azote organique est généralement linéaire en fonction du temps (ADDISCOTT, 1983; TABATABAI *et al.*, 1989).

Toutefois, en ce qui concerne nos situations, il faut rappeler que le "séchage de l'échantillon à l'air" pour les horizons de surface est un effet naturel ici compte tenu de l'importance de la saison sèche dans notre région. Pour des raisons pratiques, n'ayant pas la possibilité de réaliser ces incubations au Bénin, nous avons déterminé en France N_o et k sur des échantillons séchés à l'air dans les conditions opératoires définies ci-après.

2. MATERIELS ET METHODES

2.1. Les sols

L'azote potentiellement minéralisable a été déterminé sur les échantillons des horizons 0 - 15 cm. Le prélèvement a été effectué en deux temps :

- pour les sites 1 et 3, il a été effectué au début de la saison des pluies. Les échantillons ont été séchés à l'air, tamisés (2mm) et stockés au laboratoire avant l'incubation,
- pour le site 2, il a été effectué pendant la saison des pluies et le stockage au laboratoire a été de plus courte durée que pour les sites 1 et 3.

2.2. Technique d'incubation

La technique d'incubation est celle décrite par STANFORD et SMITH (1972). 50 g de sol sont placés dans des entonnoirs buchner en plastique garnis d'un filtre de verre. Compte tenu de la texture grossière des échantillons, il n'a pas été nécessaire d'ajouter du sable quartzeux pour faciliter le lessivage de l'azote minéral et éviter un tassement trop élevé de l'échantillon.

L'azote minéral préexistant a été lessivé par une solution de 100 ml de 10 mM CaCl_2 puis par 25 ml d'une solution de recharge cationique dont la composition est la suivante : 2,0 mM MgSO_4 ; 2,0 mM $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; 2,5 mM K_2SO_4 ; 5,0 mM $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Après la percolation, l'humidité est réajustée par succion à -30 KPa. Rappelons que l'humidité optimum de minéralisation varie entre -15 et -50 KPa (MILLER et JONHSON, 1964) ou entre -10 et -33 KPa (STANFORD et EPSTEIN, 1974). Pour limiter les pertes par évaporation, le sol reste recouvert par un tampon de laine de verre. La température d'incubation a été de $28^\circ\text{C} \pm 2$, température voisine de l'optimum pour la minéralisation de la matière organique qui selon CASSMAN et MUNNS (1980) se situe entre 30 et 35°C .

Par la suite, le sol est lessivé périodiquement par des volumes identiques des solutions utilisées ci-dessus et l'humidité réajustée par succion. D'après STANFORD et SMITH (1972), l'utilisation d'une solution diluée de CaCl_2 limiterait les perturbations physico-chimiques des sols étudiés; les apports de solution de recharge cationique permettraient d'éviter leur désaturation. Les percolations successives, tout en simulant des transferts vers la profondeur ou vers une plante, limiteraient le recyclage par réorganisation de l'azote minéralisé.

La durée de l'incubation est de 20 semaines avec 8 percolations correspondant aux intervalles de temps ci-après: 1, 2, 4, 6, 8, 12, 16, 20 semaines. Ces expériences ont été réalisées avec trois répétitions.

2.3. Méthodes d'analyse

Les formes minérales (N-NH₄ et N-NO₃) ont été dosées à l'auto - analyseur. Après dialyse, les nitrates sont réduits en nitrites par le sulfate d'hydrazine et les nitrites sont dosés par réaction colorée avec le sulfanilamide pour former un composé "diazo". L'azote ammoniacal est dosé par la réaction de BERTHELOT au bleu d'indophénol. Les résultats obtenus par cette technique sont très reproductibles puisque le coefficient de variation est inférieur à 1,5 %.

2.4. Méthode d'ajustement

L'azote minéral cumulé (N_t) recueilli dans les percolats est ajusté suivant une cinétique de 1^{er} ordre :

$$N_t = N_o(1 - e^{-kt})$$

L'azote minéral préexistant dans les échantillons de sol n'est pas comptabilisé dans N_t.

Pour la détermination de N_o et de k, nous avons effectué deux estimations, l'une avec le flush de minéralisation, et l'autre sans le flush de minéralisation, sur la base des données cumulées de chaque répétition et non de la moyenne des trois répétitions. Nous avons utilisé pour l'ajustement le module "Régression non linéaire" du logiciel STAT-ITCF (1989).

3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

3.1. Aspects méthodologiques

Les estimations de N_o et les coefficients de détermination correspondant pour chacune des situations étudiées avec ou sans le flush figurent aux tableaux VII. 1 et VII. 2.

En conservant les valeurs d'azote minéralisé au cours de la première semaine correspondant au flush de minéralisation, on obtient pour les sites 1 et 3 un ajustement imparfait qui se traduit par des coefficients de détermination faibles, le plus souvent inférieurs à 0,90. Sur ces deux sites, les valeurs de R² sont nettement améliorées et hautement significatives lorsque l'on élimine l'azote minéralisé au cours du flush de minéralisation durant la première semaine de l'incubation.

Tableau VII.1 : Estimation de l'azote potentiellement minéralisable dans l'horizon 0-15 cm (avec le flush) (mgN kg^{-1} sol)

SITES	SITE 1		SITE 2		SITE 3	
Parcelles	N0	R ²	N0	R ²	N0	R ²
FORET	165,2 ± 19,7	0,83	111,5 ± 26,3	0,92	89,4 ± 12,6	0,83
PF	-	-	-	-	61,0 ± 8,5	0,85
PSC	49,7 ± 4,9	0,85	59,8 ± 10,1	0,97	22,7 ± 2,59	0,92
PSN	41,9 ± 4,6	0,89	34,1 ± 5,5	0,95	-	-
CV	59,2 ± 7,8	0,88	48,2 ± 7,5	0,98	32,0 ± 4,3	0,89

Tableau VII.2 : Estimation de l'azote potentiellement minéralisable dans l'horizon 0-15 cm (sans le flush) (mgN kg^{-1} sol)

SITES	SITE 1		SITE 2		SITE 3	
Parcelles	N0	R ²	N0	R ²	N0	R ²
FORET	126,7 ± 25,9	0,89	-	-	85,5 ± 17,6	0,99
PF	-	-	-	-	58,2 ± 11,6	0,99
PSC	35,7 ± 4,4	0,98	85,9 ± 41,7	0,99	19,9 ± 1,9	0,99
PSN	34,0 ± 4,4	0,99	43,5 ± 12,4	0,99	-	-
CV	55,1 ± 8,3	0,99	61,9 ± 21,8	0,99	30,5 ± 49	0,99

N0 : Azote potentiellement minéralisable (mgN kg^{-1})

R² : Coefficient de détermination

Sur le site 2 par contre, l'ajustement est correct, avec des valeurs de R^2 supérieures à 0,95 et des intervalles de confiance faibles pour la modélisation incluant l'azote minéralisé au cours du flush.

Ces différences de comportement sont probablement à attribuer aux différentes époques de prélèvement des échantillons et à leur mode de stockage. Les échantillons des sites 1 et 3 ont été prélevés en début de saison de pluies et ont été stockés au laboratoire pendant une longue période avant l'incubation. Les échantillons du site 2, par contre, ont été prélevés après la première saison des pluies et ont été mis à incuber après séchage. En effet, BONDE et ROSSWALL (1987) signalent des variations saisonnières importantes de l'azote potentiellement minéralisable et nous avons déjà cité les nombreux travaux sur les effets du séchage sur la minéralisation de l'azote organique (BIRCH, 1960; AGARWAL *et al.*, 1970, etc). Les échantillons prélevés en début de saison des pluies renferment probablement une proportion relativement plus importante de corps microbiens du fait de la longue saison sèche qui précède cette période. Ces composés se minéralisent très rapidement après réhumectation en début d'incubation pendant environ une semaine dans le cas de notre essai.

3.2. Effet des systèmes de culture sur l'azote potentiellement minéralisable

Les valeurs de N_0 figurent au tableau VII.3 et les courbes cumulatives de l'azote minéralisé sont illustrées par la figure VII.1 (pour PSC, site 1). Les coefficients de variation sont faibles; ils se situent entre 3 et 5 %.

Sur le site 1, les valeurs de N_0 se classent selon: $F > CV > PSC = PSN$. La diminution de N_0 sous palmeraie et sous cultures vivrières par rapport à celui sous forêt, est respectivement de 75 et 55 %. Il ne correspond plus qu'à 6 et 8 % de l'azote total alors que sous forêt, il représente environ 10 %. La demi-vie ($\text{Log}2/k$) du stock d'azote minéralisable est assez courte, de l'ordre de 5 à 9 semaines.

Figure VII.1.

Azote potentiellement minéralisable (mgN / kg sol). Site 1 (Pobè). Palmeraie sol couvert
(prélèvement entre 0 - 15 cm en début de saison des pluies)

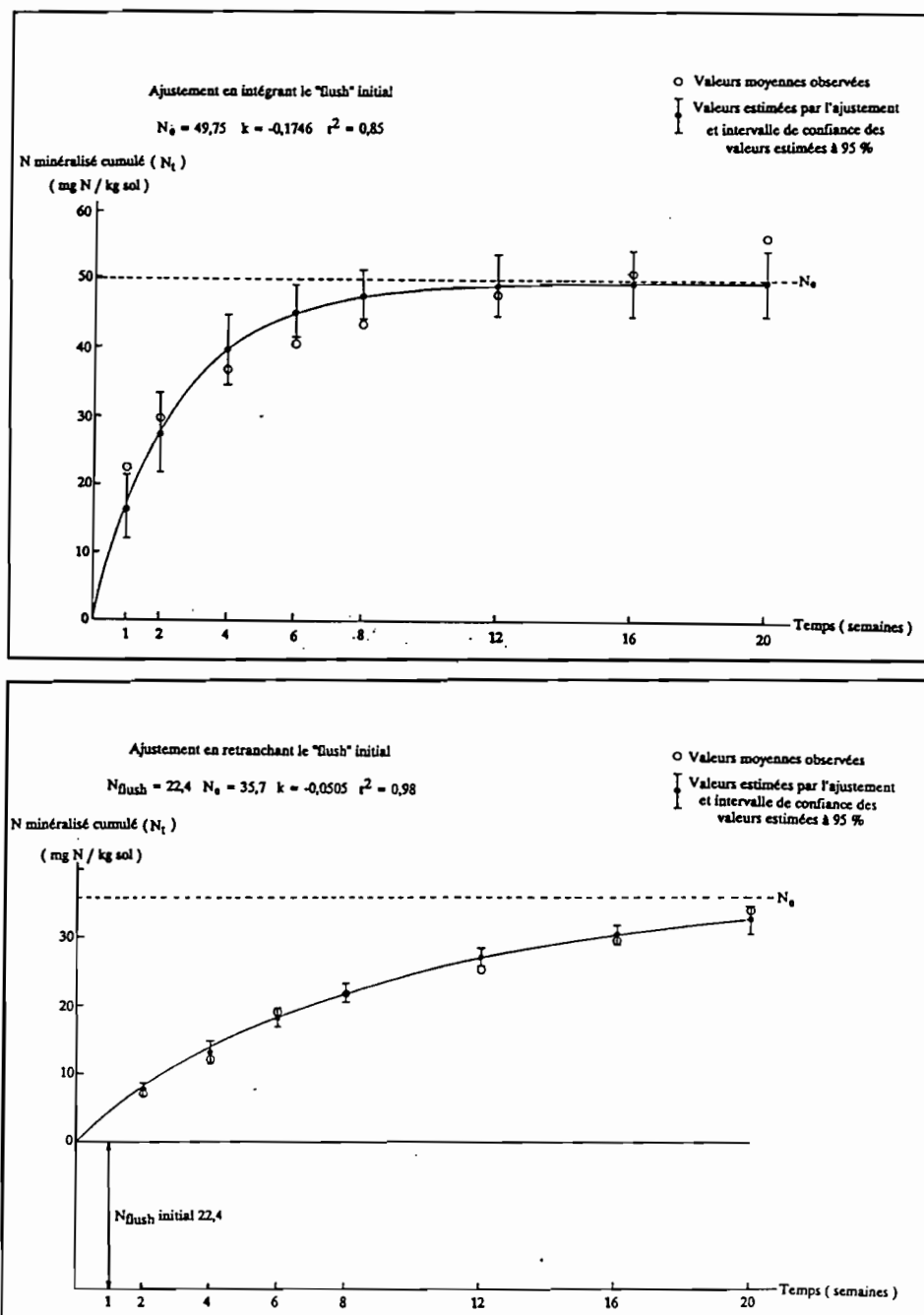


Tableau VII.3

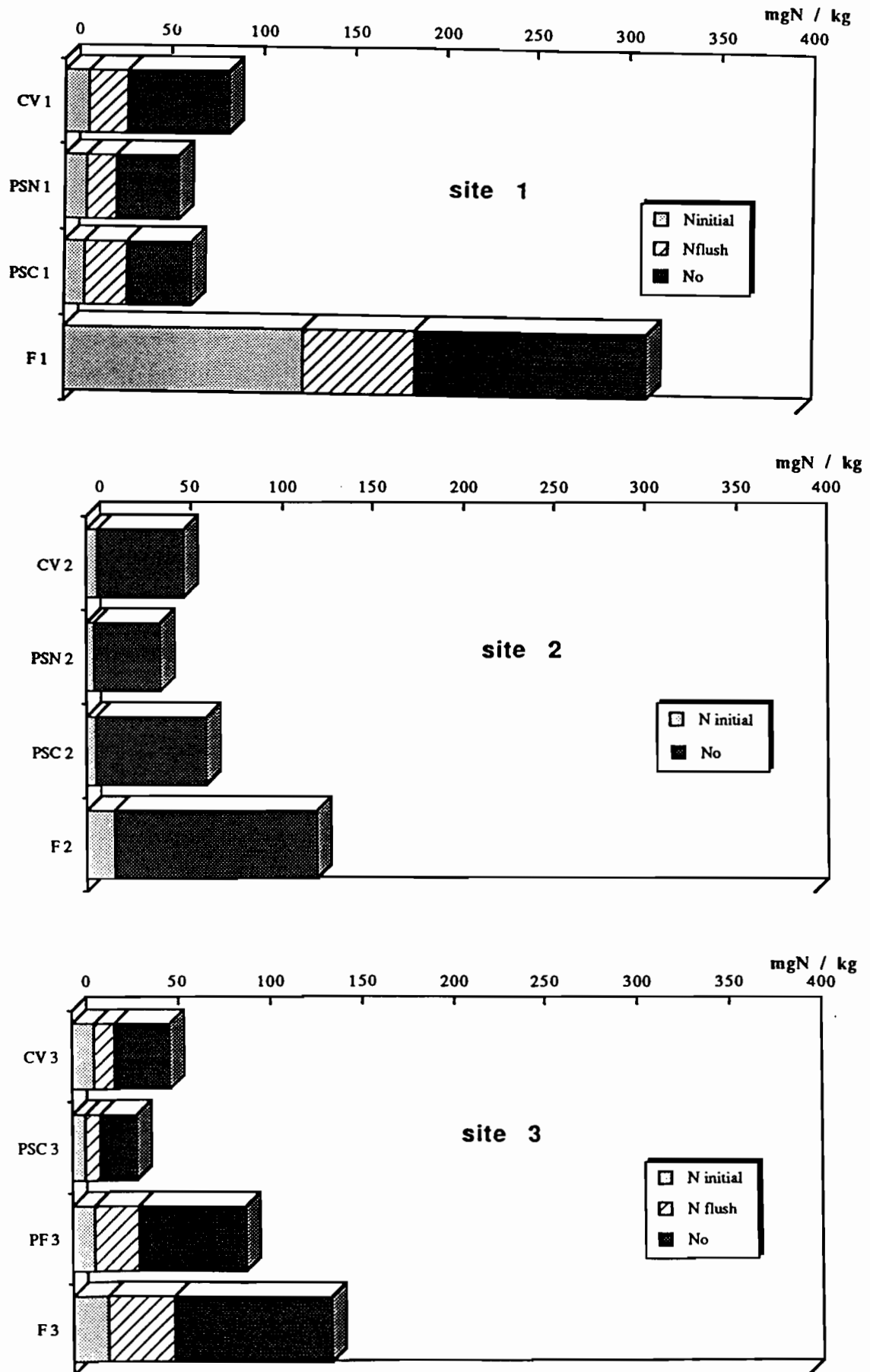
Azote total (N) et azote potentiellement minéralisable (No) (mgN kg⁻¹ de sol)

Site n° 1 (Pobè)	N	N ₀	N ₀ /N x 100	C/N	Nflush	Nflush/N ₀ x 100
F	1374	126,7	9,2	11,9	60,8	42
PSC	624	35,7	5,7	11,5	22,4	63
PSN	430	34,0	7,9	13,2	16,2	48
CV	628	55,1	8,8	15,3	20,9	33
Site n° 2 (Akpadanou)	N	N ₀	N ₀ /N x 100	C/N		
F	1270	111,5	8,8	11,3		
PSC	400	59,8	14,9	15,2		
PSN	294	34,1	11,6	16,7		
CV	628	48,2	7,7	14,0		
Site n° 3 (Ouidah)	N	N ₀	N ₀ /N x 100	C/N	Nflush	Nflush/N ₀ x 100
F	863	85,5	9,9	12,3	36,1	42
PF	635	58,2	9,2	12,9	23,8	40
PSC	247	19,9	8,0	15,4	7,6	38
CV	329	30,5	9,3	12,8	11,0	35

La hiérarchie des traitements sur le site 2 est un peu différente: F > PSC > CV > PSN. Sur ce site, les valeurs obtenues pour le stock d'azote potentiellement minéralisable représentent dans les sols cultivés 8 à 16 % de l'azote total. La demi-vie de ce compartiment de l'azote sur ce site est assez faible, de l'ordre de 5 à 6 semaines.

Figure VII.2

Teneurs en N minéral initial, N flush et N potentiellement minéralisable (No) (en mg par kg de sol) des horizons superficiels (0-15 cm) sur les sites 1, 2 et 3



Sur le site 3, les réserves minéralisables sont plus faibles que sur les deux autres sites. Chaque système de culture constitue un groupe en soi et la hiérarchie de N_o reste la même que pour l'azote total: $F > PF > CV > PSC$. Les valeurs de N_o exprimées en pourcentage de l'azote total correspondent à 8-10 % et la demi-vie est relativement plus élevée, de 7 à 10,5 semaines.

3.3. Le flux de minéralisation initiale

Il correspond à l'azote minéralisé au cours de la première semaine d'incubation. Les quantités minéralisées ne sont pas négligeables, entre 16 à 60 mgN/kg de sol sur le site 1 et 8 à 37 mg N/kg de sol sur le site 3 (annexe VII.1a). Lorsque l'on considère les valeurs engendrées par ce processus en termes relatifs, on constate que les quantités ne sont pas négligeables puisqu'elles correspondent à 30 à 60 % de N_o sur le site 1 et 40 % sur le site 3. Sur ces deux sites, il existe des différences significatives entre les systèmes de culture avec des flux initiaux relativement plus élevés sous forêt et plantation forestière que sous cultures vivrières annuelles et sous palmeraie. On note également sur le site 1 un effet résiduel significatif de la couverture de légumineuses au jeune âge des palmeraies sur le "flush" de minéralisation de l'azote.

3.4. Relations entre l'azote potentiellement minéralisable (N_o), l'azote total (N) et le flush de minéralisation (N_{flush})

Quel que soit le mode d'évaluation de N_o , il existe des relations étroites et significatives entre N_o et N_{total} ($r > 0,87$) d'une part, N_o et N_f ($r = 0,98$) d'autre part. Dans ces sols à faible teneur en matière organique, l'azote minéralisé durant le "flush de minéralisation" peut donc être considéré comme un indicateur pertinent du potentiel de minéralisation. Par contre, entre N_o et l'azote minéral préexistant d'une part, N_o et le teneur en éléments fins d'autre part, les relations sont significatives mais moins étroites que précédemment: les valeurs des coefficients de corrélations sont respectivement égales à 0,85 et 0,79.

3.5. Conclusions

Dans les études antérieures sur l'évolution des sols rouges en Afrique de l'Ouest, un des paramètres qui a été le plus souvent utilisé pour apprécier le stock organique des sols est l'azote total. L'azote total baisse après le défrichement jusqu'à atteindre un nouvel état d'équilibre qui est fonction des systèmes de cultures pratiqués. Depuis les travaux de JANSSEN (1958) qui a montré que l'azote du sol ne constitue pas une entité homogène du point de vue du processus de minéralisation plusieurs modèles ont été développés avec un ou plusieurs compartiments ou "pools" ayant des cinétiques différentes. De façon générale, il est admis l'existence de deux fractions, en ce qui concerne la fertilité azotée des sols: une fraction dite active et une fraction dite passive ayant une cinétique de minéralisation plus lente.

La méthode de STANFORD et SMITH (1972) que nous avons utilisée dans le cas de cette étude a permis d'évaluer la fraction de l'azote organique contribuant à la fertilité azotée des sols. Les résultats de notre étude montrent que le défrichement et la mise en culture entraînent une baisse de l'azote total par rapport au sol forestier, mais aussi une diminution de l'azote potentiellement minéralisable dans des proportions généralement encore plus importantes.

Dans les pays à climat contrasté, comme c'est le cas au Bénin, le flush de minéralisation est observé en début d'incubation particulièrement pour des échantillons prélevés en fin de saison sèche ou en début de saison des pluies. Il ne peut pas être considéré comme un simple artefact. Il s'agit d'un phénomène qui a toutes les chances de se produire en plein champ en début de saison des pluies qui est précédé par une longue période sèche où l'activité microbiologique est ralentie à cause de la faible humidité des sols. Nous avons vu que ce flush représente une proportion assez importante de N_o sur les deux sites (30 à 60 %) et, si l'on tient compte de la densité apparente, les quantités mises en jeu ne sont pas négligeables (40 et 20 kg de N/ha) dans les sols cultivés respectivement sur les sites 1 et 3. Dans la mesure où le flush dépend de l'évolution du sol en fonction des systèmes de culture, l'appréciation de la fertilité azotée des sols devrait inclure cette composante. Dans ces conditions, sur les sites 1 et 3, l'"azote potentiellement disponible" serait égal à $N_o + N_f$ (figure VII.2). Toutefois la hiérarchie de l'effet des traitements cultureux demeure la même que celle obtenue pour N_o .

CHAPITRE VIII

PRELEVEMENT DE L'AZOTE PAR UNE PLANTE-TEST

L'évaluation de l'effet des systèmes de culture sur la fertilité azotée des sols a été réalisée en mesurant l'azote prélevé par une plante-test cultivée en vase de végétation en serre. Il s'agit d'un processus d'absorption biologique dont les résultats seront comparés avec ceux obtenus par les tests de minéralisation et par extraction par voie chimique.

1. MATERIELS ET METHODES

1.1 Les sols

Le tableau (VIII. 1) donne les caractéristiques des quatre échantillons de terre du site 2 que nous avons utilisés pour ce test. Ils ont été prélevés dans l'horizon 0-15 cm sous forêt (F), dans les interlignes de deux parcelles plantées en palmiers à huile conduites en sol nu ou en sol couvert au jeune âge (PSN et PSC) et dans les billons pour les parcelles de cultures vivrières (CV). La terre a été séchée à l'ombre et passée au tamis de 2 mm. La terre sèche ainsi obtenue a été mélangée plusieurs fois de façon à avoir un ensemble homogène et elle a été soigneusement échantillonnée à l'aide d'un partiteur, pour le remplissage des pots.

1.2 Traitements

A chacune des quatre situations décrites ci - dessus, il a été appliqué deux traitements :

Traitement n°1 : Sans apport de solution minérale (SSM)

Traitement n°2 : Avec apport de solution minérale sans azote (ASM)

Tableau VIII.1

Caractéristiques chimiques des échantillons de sol du site 2 sur lesquels ont été faits les tests d'AZOTE ASSIMILABLE par le ray-grass

Passé cultural				
Caractéristiques	F	PSC	PSN	CV
pH (eau)	7,50	6,29	6,30	6,80
Ca cmol. kg ⁻¹	5,02	1,61	1,29	2,31
Mg	1,40	0,59	0,47	1,08
K	0,20	0,03	0,03	0,04
P assimilable (ppm)(Olsen/Dabin)	37,60	11,30	6,30	16,90
P total (ppm)	325,30	240,00	101,90	146,10
C (mg. g ⁻¹ sol)	14,40	6,10	4,90	7,20
N (mg. g ⁻¹ sol)	1,27	0,40	0,29	0,51

F : Forêt PSC : Palmeraie sol couvert PSN : Palmeraie sol nu CV : Cultures vivrières

La composition minérale des solutions, les doses d'éléments et les modalités des apports figurent en annexe VIII.1.

Le nombre de répétitions était 4.

1.3 Technique de culture

Les cultures ont été conduites dans des pots plastiques tronconiques dont le volume utile est de 914 cm³. Le poids de terre sèche sur lequel l'expérience a porté est de 1,280 kg. Les pots ont été remplis à environ 2 cm du bord en assurant une densité apparente de 1,4.

La plante-test utilisée est le ray-grass d'Italie, (*Lolium italicum*). La densité de semis est celle préconisée par LOMBAERT (1987) pour la détermination de l'assimilabilité à court terme des engrais par la méthode STANFORD et de MENT (1957). Elle est de 400 mg de

graines pour une surface de 100 cm², ce qui correspond à 613 mg par pot en tenant compte du taux moyen de germination évalué à 70 % dans un test préliminaire. Le semis a été effectué par saupoudrage, sur une surface plane et en s'assurant de l'homogénéité de la répartition. Après le semis, la surface de la terre a été recouverte par du sable (préalablement lavé aux acides, rincé et calibré entre 100 et 500 µm). La quantité utilisée par pot est de 50 g de sable, ce qui correspond à une épaisseur de 3 mm environ.

Les pots ont été répartis en quatre blocs dans une serre climatisée. Durant toute la période de culture, la température du jour a été maintenue à 27 °C et celle de la nuit à 20 °C. L'humidité relative ambiante était de 70 % le jour et de 90 % la nuit.

Avant et après le semis, il a été apporté un complément d'eau à la solution nutritive de façon à amener l'humidité dans chaque pot au 2/3 de la capacité de saturation. Par la suite, les pertes par évapotranspiration ont été compensées quotidiennement après pesée. Cette technique a permis d'éviter le drainage des solutions hors du pot de culture.

1.4 Les coupes

La première coupe est intervenue 28 jours après le semis; elle a été faite à l'aide de ciseaux suivant un plan horizontal défini par le bord du pot. La seconde coupe a été effectuée trois semaines plus tard.

A la fin de l'essai, la quantité de terre dans chaque pot a été divisée selon un plan diamétral vertical en deux parties équivalentes contrôlées par pesée. Les racines contenues dans une des parties ainsi obtenues ont été récupérées et lavées sous un jet d'eau sur un tamis à mailles fines (0,5 mm).

Les racines ont été séparées de la base des tiges pour obtenir la biomasse aérienne résiduelle.

Les matières végétales obtenues dans ces deux cas (racines et biomasse résiduelle) ont été regroupées par traitement.

1.5 Dosage de l'azote

Le poids de la biomasse végétale aérienne (feuilles + tiges), de la biomasse résiduelle (collet) et des racines a été obtenu après séchage à poids constant à l'étuve à 60 °C. Les dosages d'azote ont été effectués à l'analyseur élémentaire CHN sur les échantillons broyés finement.

2. RESULTATS ET DISCUSSIONS

2.1 Méthodologie

Les résultats concernant la somme des récoltes de ray-grass sont rassemblés dans le tableau VIII. 2. On constate que les résultats obtenus avec les traitements 1 (sans solution minérale) et 2 (avec solution minérale sans azote) sont remarquablement cohérents et précis.

Tableau VIII.2

Estimation de la biomasse totale récoltée (gramme de matière sèche par pot)

Sols sous	Traitements			
	I. Sans solution minérale		II. Avec solution minérale	
	Moyenne	Coefficient de variation	Moyenne	Coefficient de variation
Forêt	3,29 ± 0,22	4,3 %	3,72 ± 0,37	6,2 %
Palmier (sol couvert)	1,16 ± 0,09	5,0 %	2,25 ± 0,13	3,9 %
Palmier (sol nu)	0,88 ± 0,08	5,8 %	1,69 ± 0,21	7,9 %
Culture vivrière	1,26 ± 0,15	7,5 %	1,51 ± 0,13	5,8 %

2.2. Effet du précédent cultural sur la production de biomasse végétale

La quantité totale de matière sèche produite et l'analyse de variance figurent dans le tableau en annexe VIII.2 (Figure VIII.1). Sur ce tableau, on note :

- la très faible variation due à l'effet bloc ce qui conduit à traiter les données selon un dispositif en randomisation totale et à calculer une variation résiduelle totale incluant celle du bloc.
- les effets hautement significatifs du traitement passé cultural ($F > PSC > CV = PSN$) et du traitement solution minérale ($ASM > SSM$) et surtout une interaction très significative entre ces deux traitements. La comparaison des moyennes indique que l'apport de la solution minérale sans azote accroît faiblement, mais de façon significative la production de la biomasse végétale pour le sol forestier (10 %) et pour le sol de la parcelle de cultures vivrières (13 %). Par contre, sous palmeraie (sol couvert ou sol nu au jeune âge), l'apport de la solution minérale sans azote, a permis de lever les carences minérales autres que l'azote et a provoqué des accroissements importants de production de l'ordre de 80 %.

2.3 Teneurs en azote du ray - grass récolté

Les teneurs en azote de chacune des coupes figure au tableau en annexe VIII. 3. On note que :

- a) les teneurs en azote du ray - grass sur les sols cultivés sont très peu différentes d'une coupe à l'autre. Il y a une absorption presque linéaire de l'azote provenant des sols cultivés. Par contre, pour le sol forestier, il y a une différence entre la première et la deuxième coupe et cette différence s'accroît quand on apporte la solution minérale sans azote: les teneurs en azote de la première coupe sont plus élevées. Elles traduisent la présence dans le sol forestier de formes d'azote facilement minéralisables et donc rapidement disponibles pour la plante dont l'assimilation est accélérée par la fertilisation minérale et probablement d'un deuxième compartiment azoté dont la disponibilité est plus faible et l'assimilabilité par le ray-grass légèrement réduite en particulier en présence d'une solution minérale.

Figure VIII.1

Biomasse végétale totale de ray-grass récoltée (g de matière sèche) dans les sols prélevés sous forêt (F) et sous différents systèmes de cultures (PSC et PSN = Palmeraie Sol Couvert ou Nu au jeune âge ; CV = Cultures Vivrières) dans l'horizon 0-15 cm (site 2)

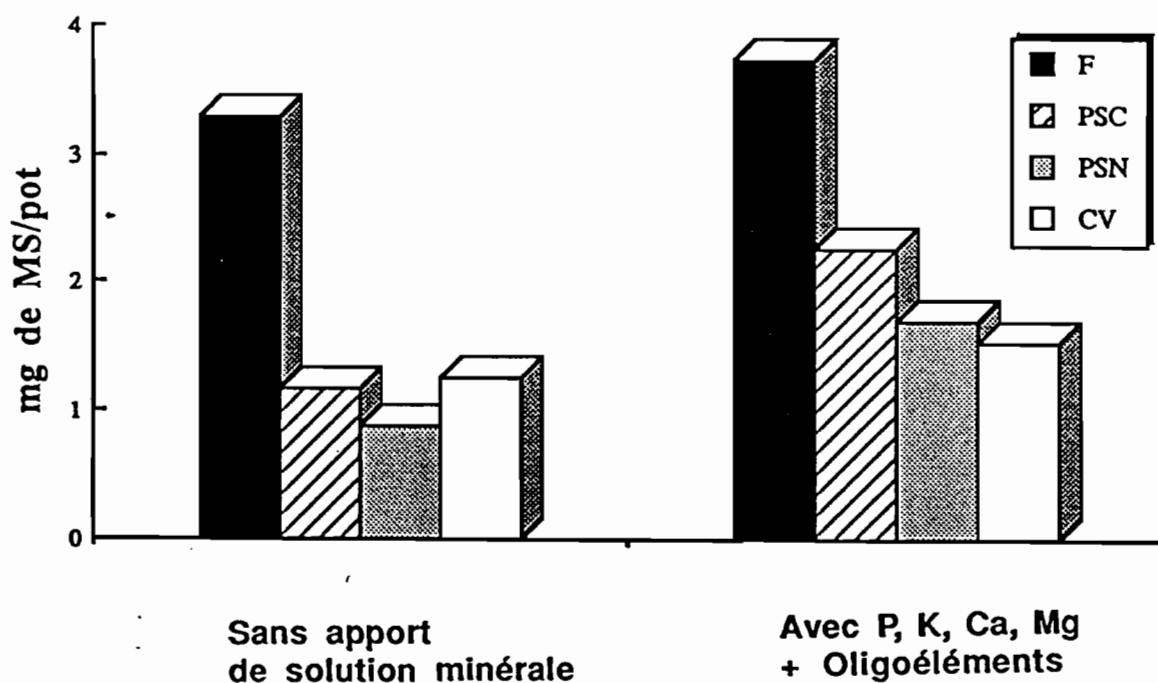
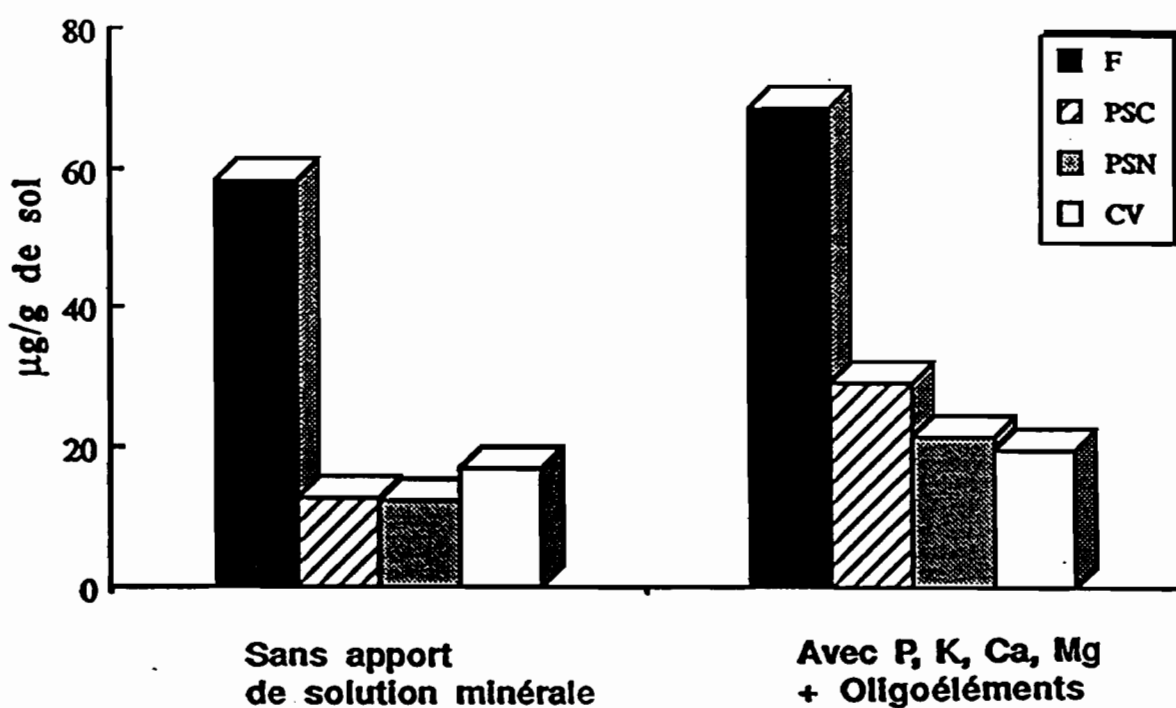


Figure VIII.2

Quantité d'azote prélevée par la plante test dans les échantillons de sols sous forêt et sous différents systèmes de cultures (PSC et PSN = Palmeraie Sol Couvert ou Nu au jeune âge ; CV = Cultures Vivrières) dans l'horizon 0-15 cm (site 2)



- b) l'apport de la solution minérale sans azote provoque une baisse des teneurs en azote du ray-grass récolté sur les sols précédemment cultivés. Cette baisse correspond à un effet de "dilution", puisque l'application de la solution minérale sans azote a par ailleurs entraîné un accroissement significatif de la biomasse végétale récoltée.
- c) l'apport de la solution minérale sans azote a un effet dépressif sur les teneurs en azote dans les racines et les collets. Ceci traduit une migration plus importante dans ces conditions de l'azote des organes de réserve vers les parties aériennes plus développées avec le traitement (ASM).

2.4 Quantités d'azote prélevées par la plante-test

Les quantités moyennes d'azote prélevées par le ray-grass et l'analyse de variance relative à l'effet des traitements figurent au tableau VIII.4 en annexe (Figure VIII.2). Le passé cultural et l'apport d'une solution minérale sans azote ont un effet très hautement significatif sur le prélèvement de l'azote par la plante-test.

L'analyse de l'interaction entre les deux traitements montre que sans apport de solution minérale, les quantités d'azote exportées par le ray-grass à partir des sols prélevés sous palmeraie sol nu au jeune âge (PSN) et sous palmeraie sol couvert au jeune âge (PSC) ne sont pas significativement différentes. Sans apport de solution minérale, le classement s'échelonne comme suit: $F > CV > PSC = PSN$.

De façon générale, à l'exception des sols sous cultures vivrières, l'apport de la solution minérale conduit à des prélèvements d'azote par le ray-grass significativement supérieurs avec un classement des traitements légèrement modifié ($F > PSC > PSN = CV$). Les moyennes des quantités d'azote provenant des sols prélevés sous cultures vivrières ne sont pas significativement différentes avec ou sans apport de solution minérale.

2.5. Teneurs en potassium, calcium, magnésium dans la première coupe

Le dosage des éléments minéraux présents dans la première coupe de ray-grass et pour les quatre échantillons de sols (annexe VIII.5 a,b,c,et d) permettent de faire la remarque suivante :

l'apport de la solution minérale sans azote a provoqué une absorption très nettement accrue de potassium sur tous les traitements. L'assimilation du potassium varie d'une manière importante d'un sol à l'autre en fonction du passé cultural, et également avec l'apport de la solution minérale. Le potassium, comme en témoignent les accroissements des teneurs paraît plus mobile que le magnésium et le calcium et il est donc absorbé en quantité relativement plus importante. La plante, cherchant à assurer une charge constante des ions alcalins et alcalino-terreux, absorbe moins les autres éléments.

2.6. Interaction entre la fertilisation minérale et l'assimilation de l'azote

Après cultures vivrières, les quantités d'azote exportées par la plante-test augmentent très faiblement avec la fertilisation minérale (sans azote), ce qui paraît indiquer un déficit des formes d'azote susceptibles de se minéraliser ou un blocage des agents de minéralisation qui n'est pas levé par la fertilisation minérale.

Par contre, pour les sols sous palmeraie, il y a une interaction significative avec un ou plusieurs éléments fertilisants apportés dans la solution minérale (sans azote) qui provoque le doublement de la quantité totale d'azote assimilée. L'apport de la solution minérale dans ces conditions semble provoquer une minéralisation active de la matière organique. L'analyse des caractéristiques des sols (tableau VIII.1) montre que sous culture, il y a une baisse importante du phosphore assimilable et du phosphore total. Il est possible que ces faibles niveaux limitent l'activité microbiologique dans ces sols. L'identification des éléments minéraux limitants devraient être effectués par un test soustractif.

3. CONCLUSIONS

Ces tests en vase de végétation ont permis de mettre en évidence des différences importantes de disponibilité de l'azote pour la plante test entre les sols cultivés sous palmeraie et les sols cultivés sous cultures vivrières. Dans le premier cas, (PSC et PSN), l'apport de la solution minérale sans azote a permis une augmentation sensible de la production de matière sèche et de la quantité d'azote prélevée. Pour favoriser l'utilisation de l'azote de ces sols, il paraît donc indispensable de lever les contraintes dues à des facteurs chimiques limitants.

Lorsqu'on compare les teneurs en azote total (N) et en azote potentiellement minéralisable (No) de ces sols, aux quantités d'azote prélevées par le ray-grass, on observe sous forêt (F) et sous palmeraie (PSC et PSN) la même hiérarchie, sauf pour les cultures vivrières (CV).

Les études de corrélation indiquent que :

- l'azote prélevé par le ray-grass (NRGssm) sans apport de solution minérale (sans azote) est étroitement lié à l'azote total ($r = 0,97$) et à l'azote potentiellement minéralisable ($r = 0,95$).
- l'azote prélevé par le ray-grass (NRGasm) avec apport de solution minérale (sans azote) est plus étroitement lié à l'azote potentiellement minéralisable ($r = 0,98$) qu'à l'azote total ($r = 0,91$).

Nous verrons enfin que l'azote prélevé par le ray-grass (NRGasm) avec apport de solution minérale (sans azote) est plus étroitement lié à l'azote hydrolysable distillable (NHD) dit "ammoniacal" ($r = 0,96$) et à l'azote hydrolysable non distillable (NHnD) dit "aminé" ($r = 0,97$), qu'à l'azote non hydrolysable ($r = 0,90$). Il convient donc d'étudier l'influence du passé cultural sur ces différentes fractions hydrolysables de l'azote.

CHAPITRE IX

LE FRACTIONNEMENT CHIMIQUE DE L'AZOTE ORGANIQUE

1. LE FRACTIONNEMENT CHIMIQUE DE L'AZOTE ORGANIQUE PAR LA TECHNIQUE D'HYDROLYSE ACIDE

1.1. Introduction

Dans les horizons de surface, l'azote minéral est généralement peu important et l'azote organique du sol représente environ 95 à 99 % de l'azote total du sol. Les estimations qui ont été faites indiquent qu'une faible proportion de l'azote organique est localisée dans la biomasse microbienne (MONROZIER et ANDREUX, 1981; STEVENSON, 1982). Il est dès lors intéressant de connaître la composition chimique des autres formes d'azote organique du sol et d'estimer la stabilité de ses différentes fractions à la suite de la mise en culture. Pour ce faire, nous avons utilisé notre dispositif expérimental pour comparer les fractions organiques azotées dans les sols forestiers et les sols soumis à différentes cultures depuis un certain nombre d'années.

La technique d'hydrolyse acide mise au point pour l'hydrolyse des protéines a été appliquée au sol pour identifier les différentes formes qui composent l'azote organique des sols. Notre intention n'est pas de passer en revue les nombreux travaux d'adaptation aux sols de cette technique dont une synthèse a été présentée par BREMNER (1982). Après le fractionnement des composés azotés par hydrolyse, plusieurs orientations ont été prises.

L'une de ces orientations consiste à utiliser les techniques d'identification des molécules simples pour quantifier les formes chimiques présentes dans les fractions obtenues par

hydrolyse et à étudier leur évolution en fonction de la végétation, des pratiques culturales et dans les profils pédologiques (VLASSAK *et al.*, 1969; SOWDEN, 1977; OLSON et LOWE, 1990; GOH et EDMEADES, 1979).

Une autre orientation vise à considérer une ou plusieurs fractions obtenues par hydrolyse comme des indices de fourniture de l'azote aux plantes. De ce point de vue, différentes méthodologies ont été développées dont :

- l'étude de la distribution des différentes fractions avant et après des incubations de longue durée au laboratoire (KEENEY et BREMNER, 1966; MOORE et RUSSELL, 1970 ; Al ZAHAWI, 1976 ; OSBORNE, 1977),
- le suivi de l'évolution de ces fractions dans les sols cultivés ou non (DECAU, 1968; CORNFORTH, 1968; HUNTJENS, 1972) ou dans les sols ayant subi différents traitements culturaux en particulier l'apport des amendements organiques ou d'engrais minéraux (SEDOGO, 1981; EGOUMENIDES *et al.*, 1987) et la comparaison de ces fractions à l'évolution des rendements ou des quantités d'azote utilisées par la plante.

Nous avons utilisé cette technique d'hydrolyse pour étudier en fonction des systèmes de cultures, la distribution des fractions de l'azote organique de ces sols sur terres de barre dans les horizons de surface et dans ceux de profondeur.

1.2. Milieux étudiés et techniques analytiques

1.2.1. Les sols

Le fractionnement par hydrolyse acide a été appliqué aux échantillons prélevés en surface et à différentes profondeurs sur les trois sites dans les interlignes sous palmeraie et dans les billons sous cultures vivrières.

1.2.2. Détermination des principales fractions d'azote du sol

Le mode opératoire est inspiré de la méthode de STEWART *et al.*, (1963) qui consiste à fractionner l'azote du sol par hydrolyse acide (HCl 6N) à ébullition sous réfrigérant pendant 16 heures. Par centrifugation la fraction solubilisée dite hydrolysable (NH) est séparée de celle restant insoluble et qui est dite "Azote non Hydrolysable" (NnH) et dosée sur le culot selon Kjeldahl.

Une fraction aliquote de la fraction hydrolysable est dosée avec entraînement à la vapeur après minéralisation et distillation de l'ammoniac en milieu alcalin (NaOH 10N). On obtient ainsi l'"Azote Hydrolysable total" (NHt).

Sur une autre partie aliquote de l'azote hydrolysable, on mesure directement l'azote distillable dans les mêmes conditions que précédemment mais sans minéralisation préalable. Ce dosage permet d'obtenir la fraction dite "Azote Hydrolysable Distillable" (NHD). Par différence, on obtient la fraction "Azote Hydrolysable non Distillable": $NHnD = NHt - NHD$.

Le mode opératoire que nous avons utilisé après quelques essais préliminaires figure en annexe IX. 1.

Aucune des fractions définies ci-dessus n'appartient à un groupe spécifique de constituants azotés du sol. Ainsi, la fraction hydrolysable distillable (NHD) appelée par certains auteurs "N ammoniacal" contiendrait de l'ammonium échangeable ou fixé préexistant dans le sol, de l'azote ammoniacal provenant de la désamination des sucres aminés au cours de l'alcalinisation par la soude ou d'autres composés azotés très labiles (BREMNER, 1967; KHAN et SOWDEN, 1971; YONEBAYASHI et HATTORI, 1980).

La fraction hydrolysable non distillable (NHnD) proviendrait pour une large part des acides aminés dérivés de l'hydrolyse de protéines. Cette fraction est aussi appelée "N aminé". La contribution des sucres aminés à cette fraction NHnD est plus faible (GOH et EDMEADES, 1978). Une partie non négligeable des composés azotés de cette fraction est enfin dénommée "azote hydrolysable non identifié".

La fraction non hydrolysable (NnH) ou "azote insoluble" serait constituée par des complexes azotés hétérocycliques (METCHE et ANDREUX, 1974).

1.3. Résultats et discussions

1.3.1. Bilans et précisions des dosages

Pour apprécier la qualité du fractionnement de l'azote organique des sols, nous avons comparé les valeurs de l'azote total obtenues par la minéralisation Kjeldhal après réduction des nitrates par le fer (N_{total}) et celles obtenues par la somme des fractions hydrolysables et non hydrolysables ($N_{\text{fractions}}$). En guise d'illustration, nous avons choisi 10 échantillons provenant de différents horizons (annexe IX.2). Les rapports $N_{\text{fractions}}/N_{\text{total}} \times 100$ varient de 92 à 101 et sont souvent inférieurs à 100 %. Ceci peut être dû :

- soit à l'importance des formes oxydées de l'azote qui ne sont pas réduites au cours de l'hydrolyse,
- soit aux conditions opératoires au cours de l'hydrolyse et des dosages successifs des différentes fractions qui augmentent les risques d'erreurs plus particulièrement pour la fraction non hydrolysable comme l'indiquent les résultats ci-après.

La reproductibilité des dosages sur chaque fraction a été évaluée sur quelques échantillons sur lesquels nous avons effectué cinq mesures. Les valeurs des coefficients de variation sont relativement plus élevées pour la fraction non hydrolysable (6-8 %) que pour les deux autres fractions (2-4 %)

Dans les conditions opératoires retenues, et pour ces sols sableux, la proportion d'azote hydrolysé est d'environ 80 % de l'azote total. Des résultats similaires ont été obtenus par KEENEY et BREMNER (1966) au cours de l'hydrolyse de 27 échantillons de sol pendant 12 heures en présence de l'HCl 6N. La proportion d'azote hydrolysé obtenu par GOH et EDMEADES (1978) varie entre 83 et 91 %. Avec la technique d'hydrolyse "par étapes" JANEL *et al.*, (1979) ont pu solubiliser 95 % de l'azote organique du sol. Il semble que l'utilisation de l'acide chlorhydrique à des concentrations élevées et en hydrolyse continue entraînerait des dégradations et des recombinaisons des oses avec des composés azotés solubilisés, ce qui expliquerait les taux un peu plus faibles de la fraction solubilisée avec cette technique. (SPIK *et al.*, 1969; JANEL *et al.*, 1979 et MONROZIER et JEANSON, 1981). En fait l'optimisation de l'hydrolyse acide des composés azotés n'est pas facile car elle dépend à la fois de plusieurs conditions

opératoires et elle n'a pas pu être standardisée pour tous les types de sol. La proportion d'azote hydrolysé dépend de facteurs comme la nature et la concentration de l'acide, la durée et la température d'hydrolyse, le ratio acide/sol, la présence ou non de certains constituants minéraux des sols, le prétraitement des échantillons à l'acide fluorhydrique pour libérer l'ammonium fixé dans les silicates argileux, etc. La technique que nous avons utilisée qui est la plus courante est suffisamment simple pour avoir été réalisée avec des répétitions sur un grand nombre d'échantillons. Elle a donné des résultats reproductibles.

1.3.2. Distribution des formes d'azote dans le profil

1.3.2.1. Variations quantitatives

1.3.2.1.1. Données générales

Nous avons regroupé en annexes IX.3a, b et c, les valeurs moyennes des trois fractions azotées obtenues par hydrolyse acide pour les échantillons correspondant aux différentes profondeurs et aux divers systèmes de cultures sur les trois sites.

En valeur absolue, les teneurs des trois fractions pour les sols sur terres de barre varient dans des limites assez larges lorsqu'on considère les facteurs discriminants que sont les systèmes de cultures et les différents horizons. La fraction hydrolysable distillable (NHD) varie entre 70 et 350 mg N/kg de sol, la fraction hydrolysable non distillable (NHnD) entre 105 et 780 mg N/kg de sol et la fraction non hydrolysable (NnH) entre 30 et 250 mg N / kg de sol. Ces valeurs sont plus élevées sous forêt que sous sols cultivés et elles diminuent en fonction de la profondeur.

Par contre, les proportions relatives des fractions azotées par rapport aux teneurs en azote total varient dans des limites plus étroites. La fraction hydrolysable non distillable (NHnD / N) qui est prépondérante varie entre 45 et 56 %. Environ 25 à 30 % de l'azote total est recueilli dans la fraction hydrolysable distillable (NHD) et 20 % dans la fraction non hydrolysable (NnH). Néanmoins, il est possible de dégager quelques tendances en fonction des sites, des systèmes de cultures et de la profondeur des échantillons étudiés.

1.3.2.1.2. Variations quantitatives des fractions azotées dans les profils

L'évolution des trois fractions en fonction de la profondeur sur les trois sites est illustrée par la figure IX.1a, b et c. Elle indique une décroissance forte de la fraction NHnD et plus modérée des fractions NHD et NnH dans les horizons supérieurs jusqu'à 35 cm. Cette diminution avec la profondeur est plus marquée dans les sols forestiers que dans les sols sous cultures vivrières ou sous palmiers à huile. Sur le site 3 en particulier, ces variations avec la profondeur sont très faiblement marquées. Les teneurs des fractions des horizons superficiels des sols sous palmiers et sous cultures vivrières sont alors identiques à celles des horizons profonds.

En dessous de 40 cm de profondeur les teneurs de ces trois fractions azotées diminuent très faiblement ou restent à peu près constantes sous forêt et sous cultures. On remarque cependant que vers 60 cm de profondeur, il y a parfois une légère augmentation des fractions azotées particulièrement de NHnD sur le site 1, sous palmier.

1.3.2.1.3. Variation quantitative des fractions azotées en fonction des systèmes de cultures

Dans les horizons supérieurs des sols cultivés, (0-15 cm et dans une moindre mesure 15-35 cm) on peut noter une forte diminution des trois fractions azotées par rapport à celle mesurée dans les horizons A11 et A12 des sols forestiers (Figure IX.2). Les indices d'appauvrissement relatif de ces fractions azotées par rapport à celles mesurées dans l'horizon de même profondeur du sol forestier permettent d'évaluer la décroissance de ces trois fractions lorsque l'on passe de l'écosystème forestier aux divers agrosystèmes (Annexe IX.4).

Les indices d'appauvrissement relatif indiquent que la mise en culture affecte toutes les fractions azotées mais plus particulièrement le NHnD. Pour les sols sous palmier à huile, l'appauvrissement de la fraction non hydrolysable de l'horizon supérieur est aussi importante sauf sur le site 1. L'appauvrissement des trois fractions azotées est un peu moins importante sous cultures vivrières que sous palmiers à huile.

Figure IX.1a

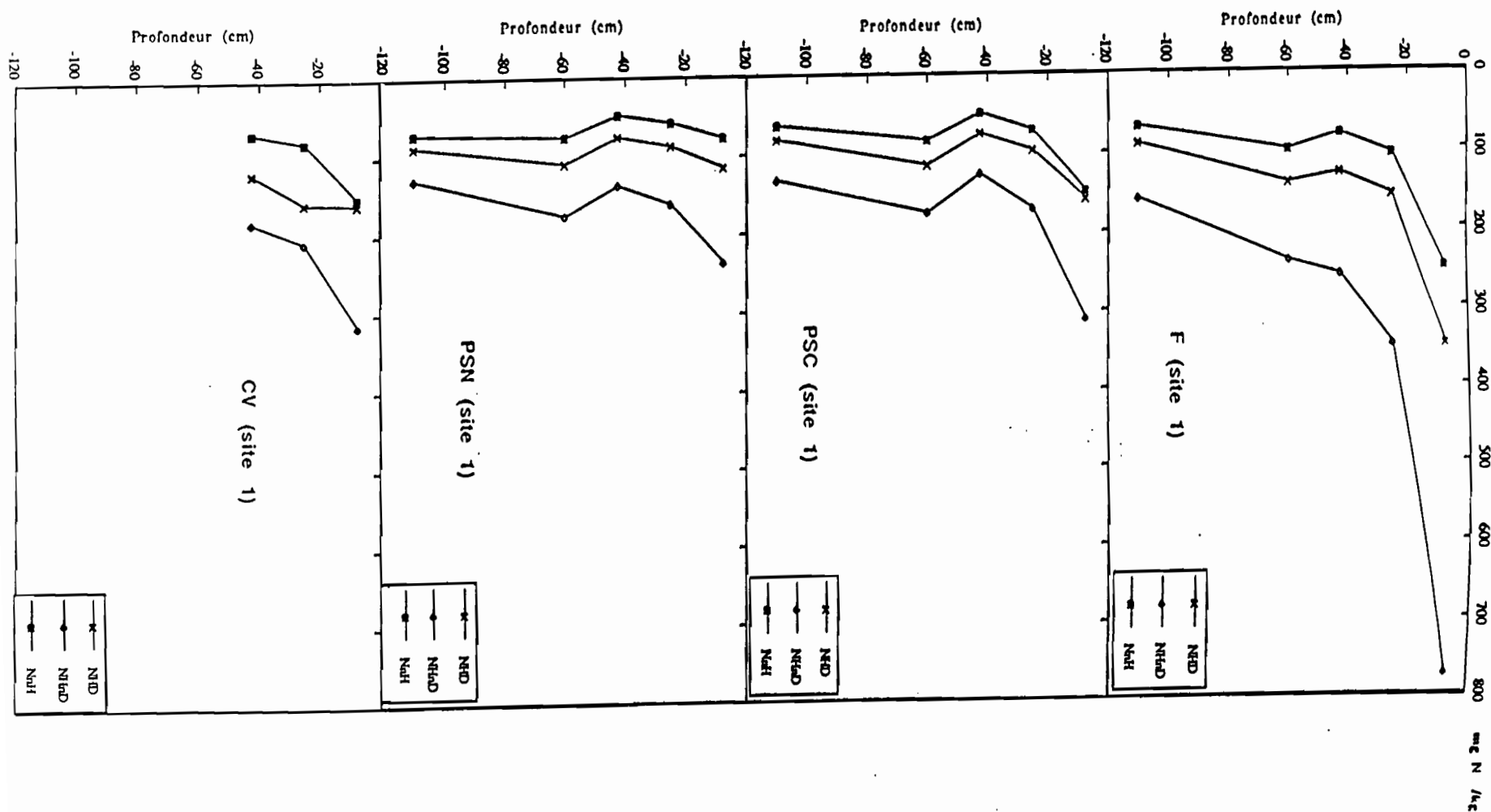


Figure IX.1b

Profils des teneurs (mgN/kg) des fractions de l'azote organique obtenues par hydrolyse acide (NHD = Azote hydrolysable distillable ; NHnD = Azote hydrolysable non distillable ; NnH = Azote non hydrolysable) sur le site 2 (Akpadanou)

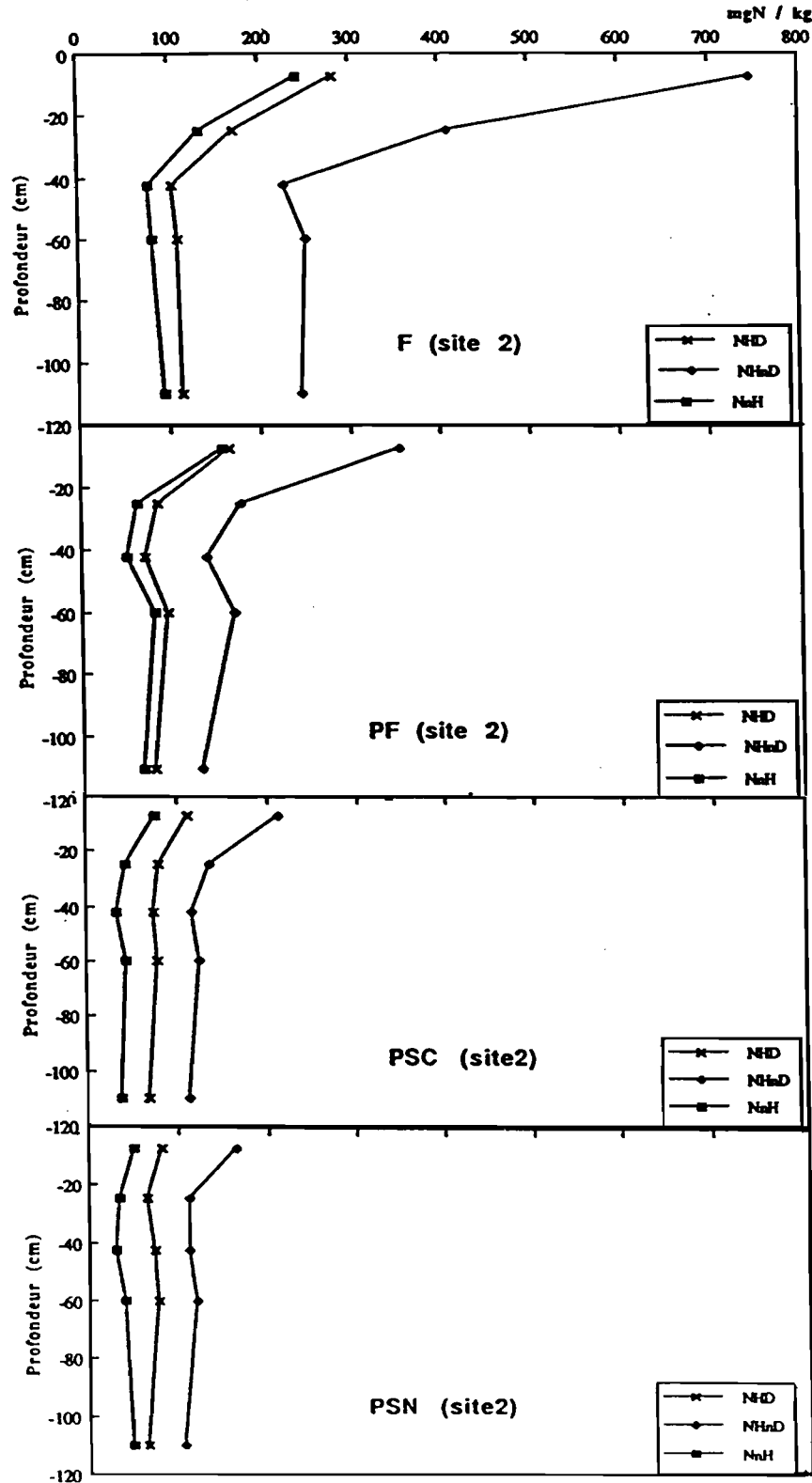


Figure IX.1c

Profils des teneurs (mgN/kg) des fractions de l'azote organique obtenues par hydrolyse acide (NHD = Azote hydrolysable distillable ; NHnD = Azote hydrolysable non distillable ; NnH = Azote non hydrolysable) sur le site 3 (Ouidah)

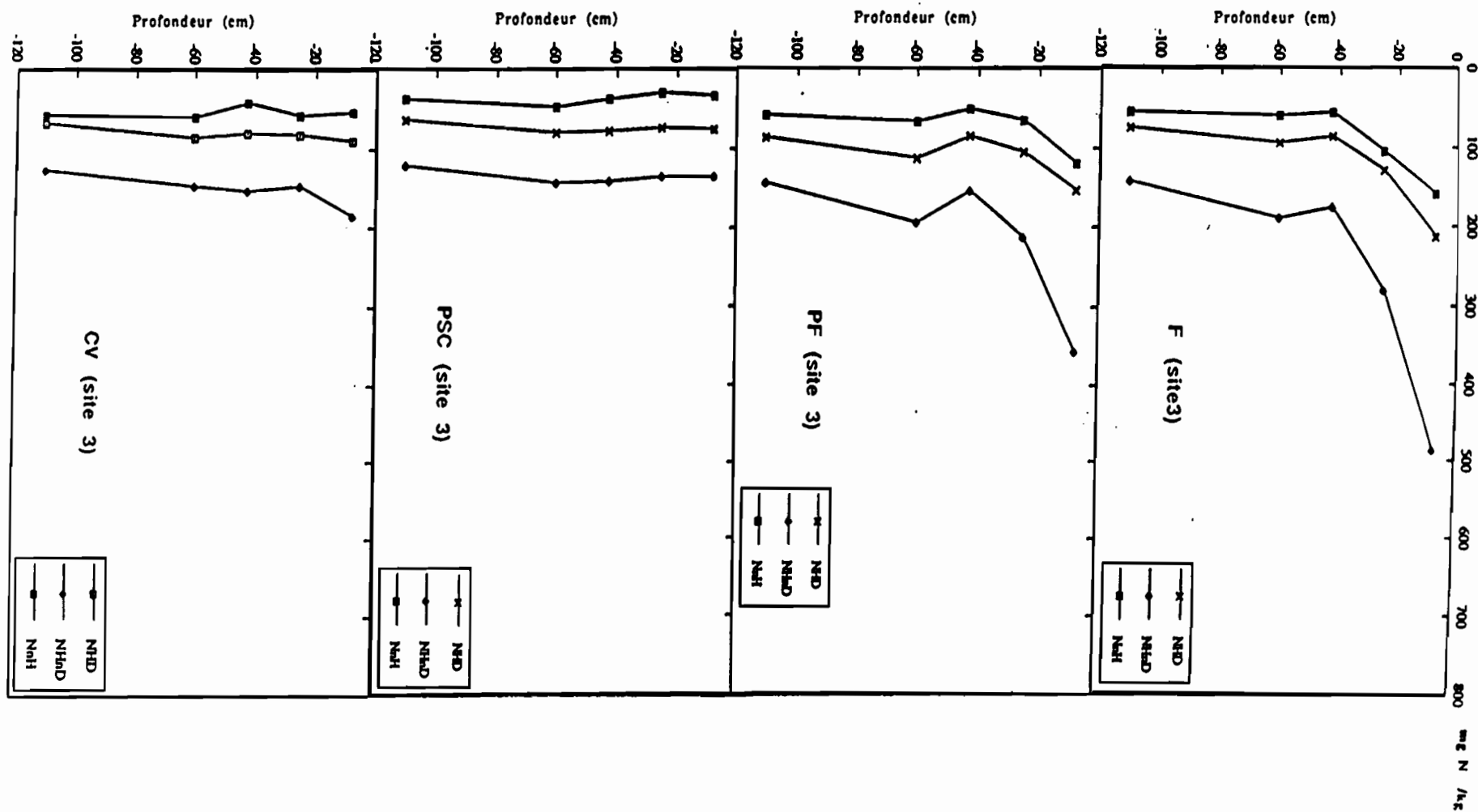
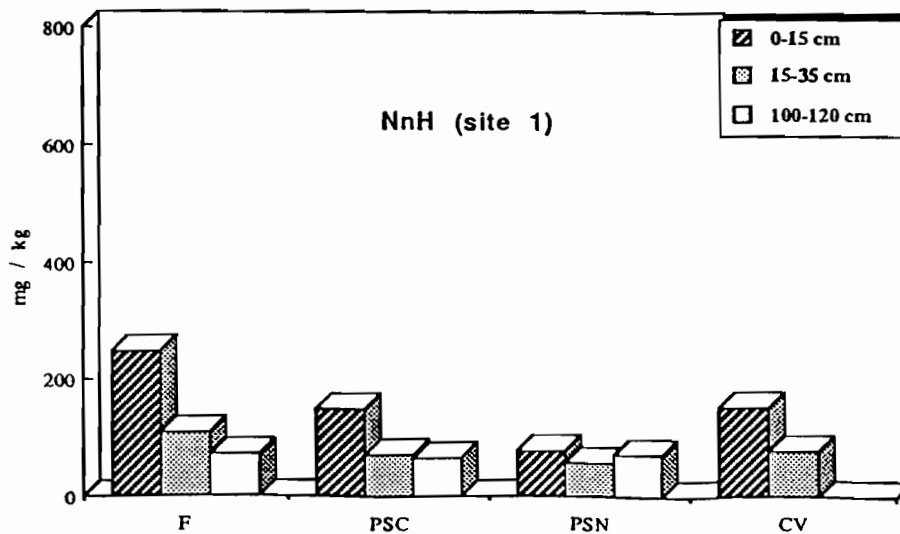
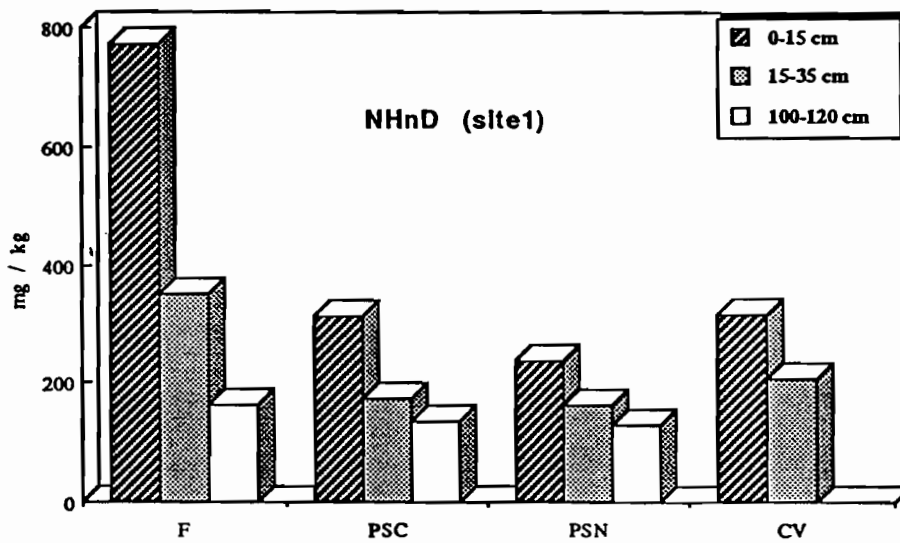
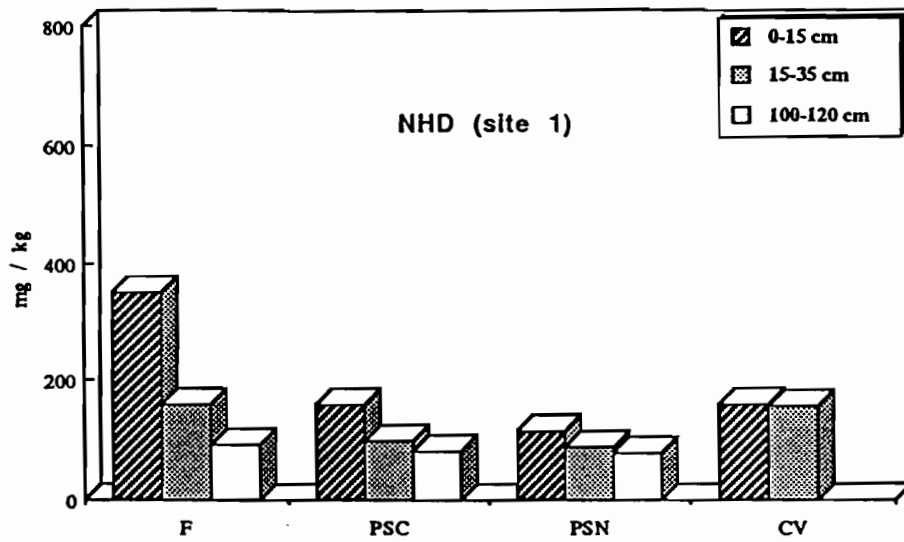


Figure IX.2

Teneurs en N (mg N. kg⁻¹) des fractions azotées obtenues par hydrolyse acide (site 1)



Les indices d'appauvrissement relatif des trois fractions azotées sont plus limités en profondeur, que ce soit sous palmiers ou sous cultures vivrières. Mais l'appauvrissement de NHD devient en général nettement plus faible que pour les deux autres fractions azotées.

La mise en culture provoque une baisse des teneurs de ces trois fractions azotées plus forte dans l'horizon supérieur, mais encore importante dans les horizons profonds lorsqu'ils sont encore sableux et pauvres en argile (site 2 et 3) que ce soit sous palmiers à huile ou sous cultures vivrières. La hiérarchisation de ces trois fractions azotées dues aux traitements culturels demeure la même que celle observée pour les teneurs en azote total, sur les trois sites: $F > PF > CV > PSC > PSN$

Cette évolution des différentes fractions avec la mise en culture a été observée par différents auteurs dans des essais en pot en serre, dans la comparaison des sols sous forêt et des sols cultivés ou la comparaison des parcelles ayant subi différents traitements culturels (HUNTJENS,1972; OSBORNE,1977)

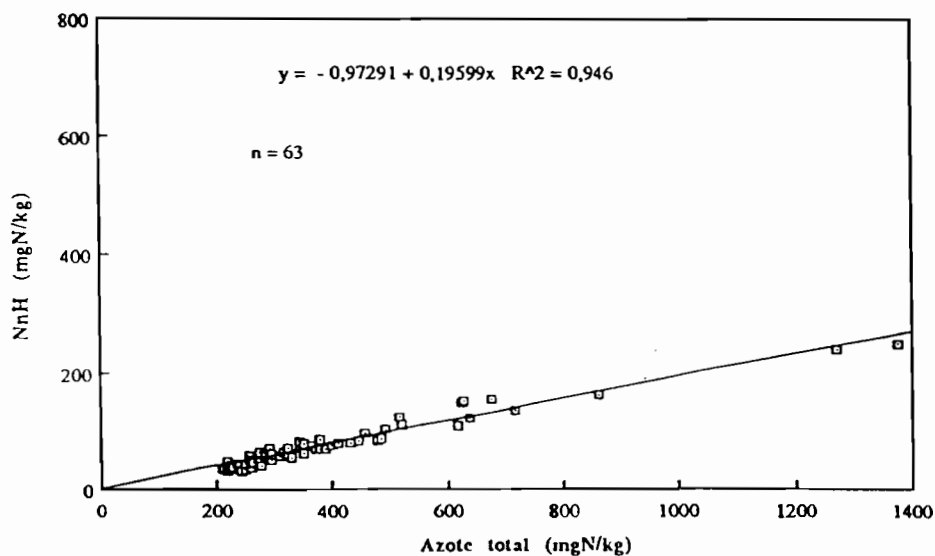
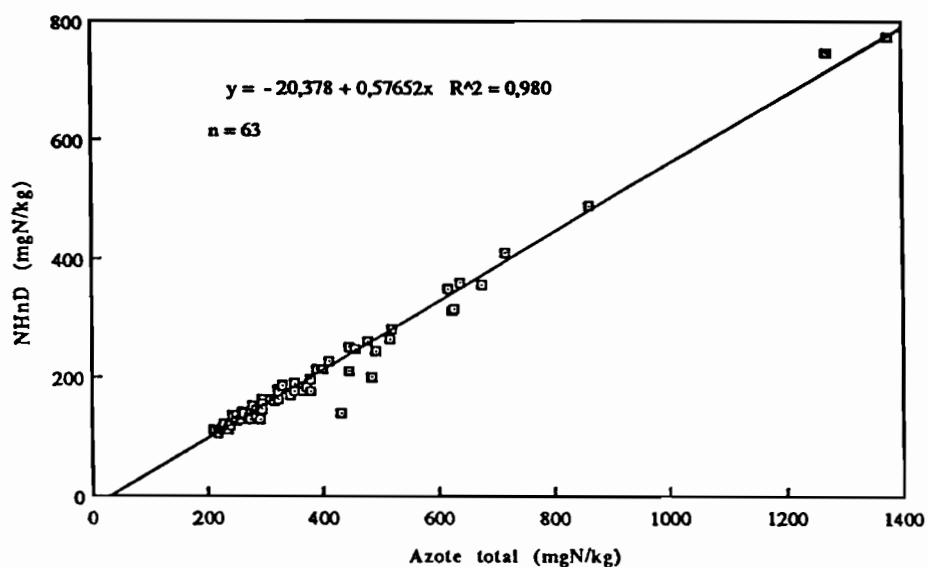
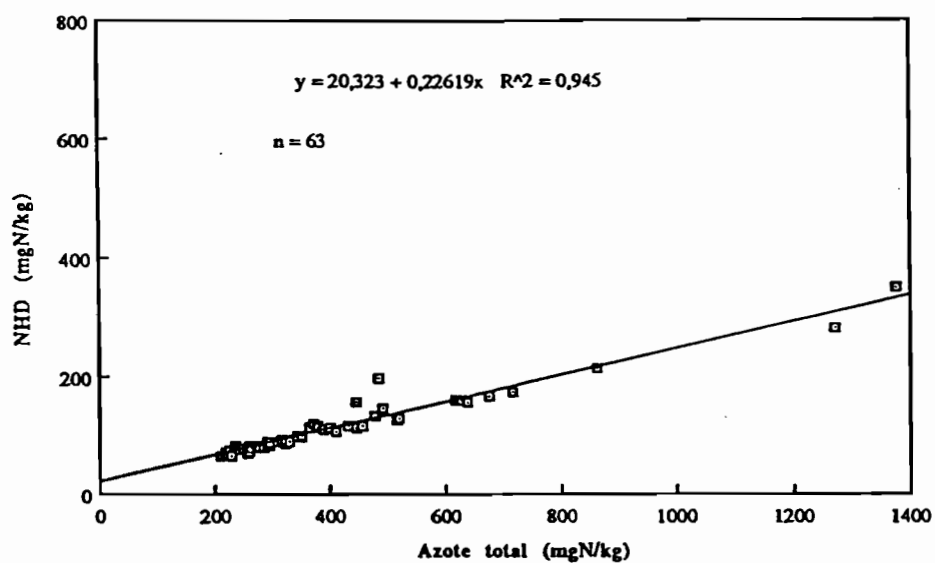
Nos résultats indiquent, en résumé, que les trois fractions azotées obtenues par hydrolyse acide diminuent fortement avec la mise en culture. Il existe une dépendance étroite entre chacune des fractions et les teneurs en azote total restant dans les sols cultivés comme l'indiquent les corrélations très hautement significatives (Figure n° IX.3).

Ces corrélations mettent en évidence le fait que la fraction la plus abondante (NHnD) qui contient les acides aminés, est également la fraction azotée qui accuse la baisse la plus importante avec la mise en culture.

1.3.2.2. Variations qualitatives des fractions azotées

Les variations qualitatives des composés azotés en fonction de la profondeur et des systèmes de cultures sont évaluées par les teneurs relatives des fractions: NHD/N, NHnD/N et NnH/N (annexe IX.5 a,b,c). Il s'agit de quelques tendances observées en fonction des sites, des systèmes de cultures et de la profondeur, les valeurs obtenues variant dans des limites assez étroites.

Figure IX.3
Relations entre la fraction hydrolysable distillable (NHD), la fraction hydrolysable non distillable (NHnD), la fraction non hydrolysable (NnH) et l'azote total



Le rapport NHD/N augmente avec la profondeur, parallèlement à l'augmentation des teneurs en éléments fins sauf sur le site 3 sous palmeraie où l'on observe une tendance inverse. Le rapport NHD/N augmente relativement quand on passe des sols forestiers aux sols sous palmiers et sous cultures vivrières, particulièrement dans les horizons profonds. Toutefois, sur le site 1, les augmentations relatives de NHD/N avec les cultures sont faibles en surface et en profondeur.

Le rapport NHnD/N diminue des horizons superficiels aux horizons profonds, sous forêt et sous cultures. Ce rapport diminue avec la mise en culture sur les sites 1 et 2 particulièrement sous palmeraie lorsque le sol a été maintenu couvert au jeune âge. Sur le site 3 par contre, les teneurs relatives NHnD/N varient peu avec la mise en culture.

Le rapport NnH / N augmente très faiblement et irrégulièrement avec la profondeur sous forêt et sous plantations forestières. Sous palmeraie, sur les sites 1 et 2, il augmente en profondeur lorsque le sol est maintenu nu au jeune âge; inversement ces teneurs relatives de la fraction azotée non hydrolysable ont tendance à diminuer dans les horizons profonds lorsque le sol est maintenu avec une plante de couverture dans les jeunes plantations. Enfin, on note un appauvrissement général sur tout le profil sous palmeraie sur le site 3.

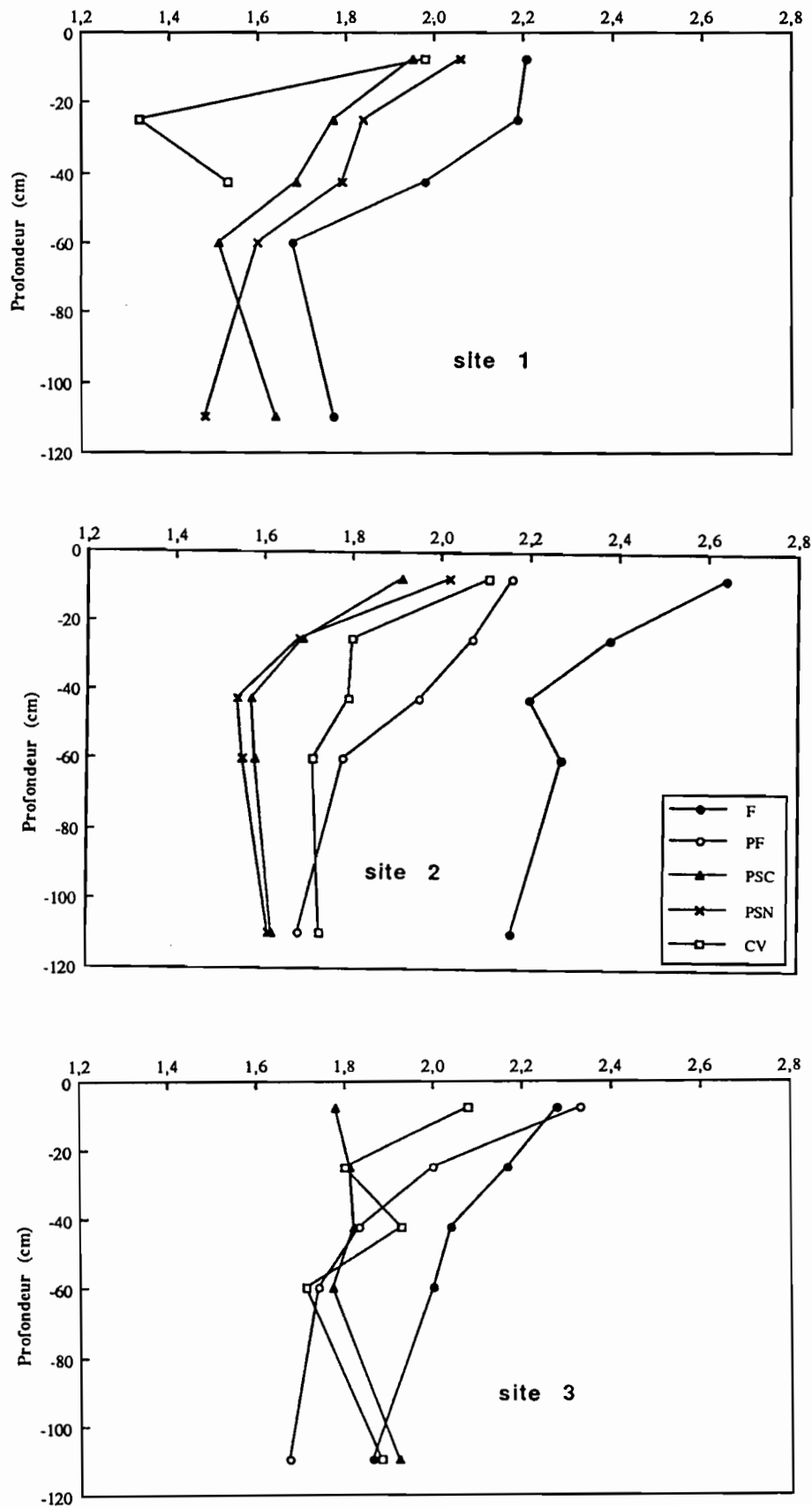
1.3.2.3. Variations du rapport NHnD / NHD

Le rapport NHnD/NHD a été considéré parfois comme un paramètre susceptible de juger du statut azoté du sol en terme de fertilité (EGOUMENIDES *et al.*, 1987; WANEUKEN, 1991). Ce rapport diminue avec la profondeur sous forêt et sous cultures. Il décroît aussi quand on passe des sols forestiers aux sols cultivés. La hiérarchie des valeurs de ce rapport sous les différents systèmes de culture est la suivante: F > PF > CV > PSC > PSN (figure IX.4; annexe IX.7).

La matrice de corrélations entre les caractéristiques relatives aux composés azotés figurent en annexe IX.8. Dans les horizons de surface, les valeurs de l'azote potentiellement minéralisable (No) obtenues par la méthode d'incubation-percolation de SANFORD et SMITH, (1972) d'une part, celles de l'"azote disponible" (Ndisp) obtenues par hydrolyse alcaline (GIANELLO et BREMNER, 1986) (chapitre IX.2) sont effectivement corrélées

Figure IX.4

Profils des rapports $NHnD/NHD$ sur les sites 1 (Pobè), 2 (Akpadanou) et 3 (Ouidah)



significativement au rapport NHnD/NHD ($r = 0,72$ pour No , $r = 0,74$ pour Ndisp). Toutefois, les études de corrélation sur l'ensemble des échantillons (tous sites et tous horizons confondus) indiquent que ce rapport NHnD/NHD est moins bien lié à l'azote total ($r = 0,59$) que chacune des fractions ne l'est avec l'azote total ($r = 0,97$ pour NHD ; $r = 0,99$ pour NHnD ; $r = 0,97$ pour NnH). Les variations de ce rapport sont toutefois mieux expliquées lorsque l'on intègre à la régression les teneurs en éléments fins ($r = 0,72$).

1.4. Conclusion

La mise en culture provoque des variations quantitatives surtout importantes dans les horizons de surface 0-35 cm. Ces variations affectent surtout la fraction dite "aminée" ou hydrolysable non distillable (NHnD). Néanmoins, le bilan des pertes par rapport aux sols forestiers indique que sous certains systèmes de culture, (par ex: PSC sur les sites 2 et 3) il y a aussi une baisse importante de la fraction non hydrolysable (NnH) (Tableau IX.1 - Annexe IX.6) qui serait pourtant constituée par des complexes hétérocycliques, donc des formes théoriquement assez stables de l'azote.

Le rapport de l'azote protéique à l'azote dit "ammoniacal" (NHnD/NHD) diminue d'une manière plus ou moins marquée avec la mise en culture et avec la profondeur. Il existe une liaison étroite et significative entre NHnD/NHD et le potentiel de minéralisation, mais cette liaison est plus faible que celle entre No et Ntotal ou No et chaque fraction prise séparément. Les variations de ce rapport sont mieux expliquées lorsque l'on tient compte à la fois de la teneur en azote total et en argile des échantillons. Il ne peut donc être utilisé comme indice de fertilité que localement, sur des sols à texture analogue.

Tableau IX.1

Matrice de corrélations entre les caractéristiques relatives aux composés azotés

Echantillons (0-15 cm) prélevés sur les trois sites sous forêt et sous les différents systèmes de cultures

	No	N	Ctot	NHD	NHnD	NnH	Ndisp	Ninit	A + L	Ph
No	1.000									
N	0.947	1.000								
Ctot	0.962	0.985	1.000							
NHD	0.949	0.987	0.984	1.000						
NHnD	0.956	0.984	0.973	0.975	1.000					
NnH	0.894	0.977	0.971	0.960	0.951	1.000				
Ndisp	0.901	0.941	0.929	0.932	0.923	0.908	1.000			
Ninit	0.653	0.647	0.661	0.729	0.630	0.568	0.593	1.000		
A + L	0.640	0.735	0.752	0.814	0.695	0.735	0.684	0.841	1.000	
Ph	0.489	0.532	0.487	0.414	0.554	0.534	0.352	-0.014	-0.019	1.000

Les valeurs supérieures à 0.55 ou à 0.68 sont significatives respectivement au seuil de 5% et de 1%.

2. TEST D'EVALUATION DE L'AZOTE POTENTIELLEMENT DISPONIBLE

2.1. Introduction

Dans la littérature, il existe plusieurs méthodes pour apprécier la fraction de l'azote organique qui en se minéralisant contribue à l'alimentation azotée des plantes. Ces différentes techniques ont été comparées avec les résultats obtenus par des tests d'incubation de la minéralisation nette par voie biologique (GIANELO et BREMNER, 1986). Parmi ces méthodes chimiques, l'hydrolyse alcaline ménagée avec le tampon phosphate-borate est rapide et ne nécessite pas de filtration ou d'étapes intermédiaires. Les résultats obtenus par cette méthode sont fortement corrélés avec ceux obtenus par les tests biologiques de minéralisation de l'azote et ils expliquent 90 % des variations de l'azote potentiellement minéralisable (GIANELO et BREMNER, 1988).

Cette méthode est inspirée des résultats de TRACY (1952) qui indique que l'azote contenu dans le glucosamine est converti quantitativement en NH_3 quand ce composé est distillé en présence du tampon (phosphate borate) à pH 11, 2. GIANELO et BREMNER (1986b) ont donc adapté cette méthode en étudiant sur des échantillons de sols variés, l'effet de différents facteurs pouvant affecter la production d'ammoniac pendant la distillation avec le tampon phosphate borate en particulier le rapport sol/solution tampon et le temps de distillation. Leur mode opératoire que nous avons utilisé, figure en Annexe IX.9.

2.2. Résultats

Nous avons évalué la précision de cette méthode en réalisant plusieurs répétitions de quelques échantillons. Les faibles valeurs des coefficients de variation (1,5-2,5 %) constituent un des intérêts de cette méthode dans laquelle n'interviennent pas des étapes d'extraction, de filtration ou de risque de pertes au cours de la séparation et du transfert de l'hydrolysate.

Les quantités d'azote dosées par cette méthode sont comprises entre 6 et 35 mg/kg de sol. Par conséquent, elles sont du même ordre de grandeur que celles obtenues par GIANELO et BREMNER (1986 a et b). Sur les trois sites, on peut noter une baisse de l'"azote potentiellement disponible" particulièrement nette entre les horizons de surface (0-15 cm) et les horizons sous jacents (15-35 cm). Plus en profondeur les quantités d'azote dosées décroissent faiblement (tableau IX.2).

L'"azote potentiellement disponible" diminue très fortement dans l'horizon de surface en fonction des systèmes de cultures; par contre en profondeur les teneurs sont analogues dans les sols forestiers et les divers agrosystèmes.

Les quantités d'azote dit "potentiellement disponible" obtenues par cette méthode d'hydrolyse en milieu alcalin sont corrélées aux teneurs en azote total et aux différentes fractions azotées obtenues par hydrolyse acide, particulièrement aux fractions hydrolysables distillables (NHD) et non distillables (NHnD).

2.3 Conclusion

Pour ces sols sur terres de barre, l'hydrolyse alcaline de composés azotés permet d'identifier des compartiments azotés dont les teneurs dans les sols cultivés sont plus proches des valeurs de N_o que ne le sont celles des fractions obtenues par hydrolyse acide. De plus, l'intérêt de ce test réside surtout dans sa simplicité, sa précision et la rapidité de sa mise en oeuvre.

Tableau IX.2 : Indice de l'azote disponible ($\text{mgNkg}^{-1} \text{ sol}$) selon GIANELO et BREMNER, 1986 - Site 1

	F	P S C	P S N	C V
0-15 cm	35,16	16,96	15,64	19,39
15-35 cm	18,66	13,67	13,95	17,83
35-50 cm	19,24	11,22	10,81	16,40
50-70 cm	18,11	15,99	14,66	22,21
100-120 cm	11,41	11,45	10,55	9,82

Site 2

	F	P F	P S C	P S N	C V
0-15 cm	30,80	18,90	12,20	8,90	19,39
15-35 cm	17,41	12,08	11,48	8,90	11,13
35-50 cm	11,45	10,82	11,45	5,90	12,11
50-70 cm	14,09	10,32	12,57	10,68	9,78
100-120 cm	14,54	21,39	7,81	11,03	11,83

Site 3

	F	P F	P S C	C V
0-15 cm	31,71	23,68	11,32	12,86
15-35 cm	19,62	13,74	7,86	11,15
35-50 cm	12,71	12,27	12,16	13,18
50-70 cm	15,28	13,83	9,89	9,77
100-120 cm	15,10	15,17	6,62	9,26

F = Forêt ; PF = Plantations Forestières ; PSC = Palmeraie Sol Couvert ; PSN = Palmeraie Sol Nu ; CV = Cultures Vivrières

CHAPITRE X

LE FRACTIONNEMENT GRANULOMETRIQUE DE LA MATIERE ORGANIQUE

1. INTRODUCTION

Depuis une vingtaine d'années environ, de nombreux travaux ont été consacrés aux possibilités offertes par les fractionnements granulométriques pour étudier :

- la nature des matières organiques qui assurent la stabilité des micro-agrégats dans les sols (BRUCKERT et KILBERTUS, 1980; TURCHENECK et OADES, 1979),
- la nature, les propriétés et la dynamique des matières organiques associées aux différentes particules (TURCHENECK et OADES, 1979; BALESDEMENT *et al.*, 1987; WARREN et WHITEHEAD, 1988).

Cette technique présente en effet les intérêts suivants :

- elle est relativement simple et facile à mettre en oeuvre,
- elle est peu dénaturante,
- elle permet d'obtenir des fractions organiques très différentes quant à leur morphologie (matières organiques figurées ou amorphes), leur composition chimique (rapports C/N très différents) et leur dynamique (FELLER *et al.*, 1983 ; FRANCOIS, 1988).

L'une des difficultés d'application de cette méthode réside dans le choix de la technique de fractionnement granulométrique sans utiliser des dispersants chimiques et de séparation des différents constituants du sol, sans les fragmenter ou modifier leur composition chimique. Dans la littérature, plusieurs méthodes sont suggérées, selon l'objectif des recherches et la nature des échantillons analysés. D'une façon générale, la

dispersion des échantillons est assurée par simple agitation mécanique dans l'eau, avec ou sans traitement par les ultrasons.

Les paramètres qui font varier les résultats sont l'énergie d'agitation, le prétraitement par les ultrasons et le temps d'application de ces deux méthodes. L'agitation prolongée dans l'eau en présence de billes de verre permet de pallier certains inconvénients de l'utilisation des ultrasons, mais, par contre, la dispersion des éléments fins ($< 20 \mu\text{m}$) est souvent incomplète à l'exception, peut-être, des sols sableux.(FELLER *et al.*, 1991c). Toutefois l'application des ultrasons sur le sol entier peut entraîner une altération des résidus végétaux figurés dont les fragments enrichissent de façon artificielle les teneurs en matière organique des fractions fines. Néanmoins cette méthode de dispersion a été utilisée par de nombreux chercheurs (par exemple ANDERSON *et al.*, 1981; TIESSEN et STEWART, 1983).

En ce qui concerne la séparation des particules, différentes techniques sont souvent utilisées en fonction des objectifs: le tamisage par voie humide, la densitométrie, la sédimentation dans une allonge ou la centrifugation

L'efficacité de ces méthodes peut être améliorée lorsqu'on fait subir aux échantillons un prétraitement par des agents chimiques dispersants, mais la solubilisation d'une partie des matières humiques n'est pas sans inconvénient lorsque l'on veut étudier la matière organique associée aux complexes organo-minéraux du sol (FRANCOIS, 1988). Les avantages et les inconvénients de ces différentes méthodes de dispersion prises séparément ou associées les unes aux autres ont été récemment discutées par FELLER *et al.*, (1991c).

Après divers essais méthodologiques rapportés ci-dessous, nous avons utilisé une technique de fractionnement granulométrique inspirée des travaux de FELLER précités, pour séparer les matières organiques associées aux différentes fractions granulométriques des sols. Cette méthode a été appliquée aux horizons de surface des parcelles sous forêt et sous palmeraie.

2. MATERIEL ET METHODES

2.1 Choix de la méthode de fractionnement

Une étude préliminaire permettant d'effectuer le choix de la méthode de fractionnement la mieux adaptée à ces échantillons de sols ferrallitiques sableux faiblement argileux, a été réalisée dans un premier temps. L'objectif était d'obtenir une dispersion maximum des particules élémentaires tout en assurant une faible altération des matières organiques associées aux différentes fractions granulométriques en particulier des résidus végétaux.

La dispersion des échantillons est assurée en combinant l'agitation dans l'eau en présence de billes de verre de diamètre égal à 1 centimètre à l'ultrasonication des échantillons. Concrètement nous avons cherché une réponse aux deux questions suivantes :

- sur quelles fractions appliquer les ultrasons ?
- quelle doit être la durée de l'application des ultrasons ?

Dans les horizons humifères de ces sols sableux, l'agitation mécanique dans l'eau avec des billes de verre permet de séparer une fraction sableuse ($> 200 \mu\text{m}$) qui contient peu d'agrégats stables. Il est donc préférable de ne pas soumettre cette fraction grossière aux ultrasons ce qui risquerait d'aboutir à une fragmentation des débris figurés dont une partie serait transférée artificiellement dans les fractions plus fines.

Après agitation mécanique dans l'eau et séparation par tamisage de la fraction sableuse grossière nous avons donc comparé les différents modes de dispersion suivants :

- application des ultrasons pendant 15 mn sur la suspension inférieure à $200 \mu\text{m}$ (technique n°1),
- application des ultrasons pendant 5 mn sur la suspension inférieure à $200 \mu\text{m}$ puis après tamisage à $50 \mu\text{m}$, application des ultrasons pendant 10 mn sur la suspension inférieure à $50 \mu\text{m}$ (technique n°2),
- application des ultrasons pendant 15 mn sur la suspension inférieure à $50 \mu\text{m}$ (technique n°3).

Les fractions supérieures à $50 \mu\text{m}$ ont été obtenues par tamisage à l'eau et les fractions inférieures à $50 \mu\text{m}$ par sédimentation et siphonage en allonge.

Pour apprécier l'efficacité de chaque méthode, nous avons comparé les résultats pondéraux des fractions à ceux obtenus par traitement du sol à l'eau oxygénée et dispersion à l'hexamétaphosphate de sodium, sans application d'ultrasons (technique n°4). Cette dernière méthode utilisée comme référence permet d'avoir une dispersion maximum des constituants minéraux et des microagrégats de la taille des particules d'argiles et de limons fins; mais elle détruit la plus grande partie des constituants organiques.

Les résultats figurent aux tableaux X.1 et X.2. La technique n°1 permet d'obtenir une dispersion assez bonne des microagrégats $>50\ \mu\text{m}$. Les taux de récupération des fractions limoneuse et argileuses sont identiques à celles obtenues par l'analyse mécanique (technique n°4). La technique n°2 conduit à un taux de récupération plus faible de la fraction argileuse ($0-2\ \mu\text{m}$); une partie des éléments fins restant dans les fractions limoneuses ($50-2\ \mu\text{m}$). La technique n°3 ne permet pas d'obtenir un taux de récupération satisfaisant des fractions $< 50\ \mu\text{m}$. A l'évidence, une forte proportion des argiles et des limons se retrouve dans la fraction $200\ \mu\text{m}$ à $50\ \mu\text{m}$. L'application de la technique n°1 aux horizons humifères de ces sols permet donc d'obtenir une bonne dispersion du sol. Cependant, l'observation morphologique des fractions laisse penser que l'application des ultrasons pendant 15 mn sur la fraction inférieure à $200\ \mu\text{m}$ entraîne une altération des débris végétaux et leur transfert dans les fractions plus fines; cela est confirmé par la teneur en carbone nettement plus faible de la fraction ainsi obtenue par rapport à celle de la fraction équivalente obtenue par la méthode 2. Son évaluation est du reste entachée d'une certaine incertitude. Parallèlement, on note un enrichissement en carbone de la fraction $50-2\ \mu\text{m}$.

Aussi avons-nous finalement retenu d'utiliser la technique n° 2 pour les horizons de surface riches en débris végétaux. Elle est décrite en annexe X.1. Elle constitue le meilleur compromis pour ce type de sol.

Pour les horizons de pénétration humifère (AB) nettement plus riches en constituants argileux, en particulier sur le site 1, cette dernière technique ne permet pas une bonne dispersion des éléments fins. La grande stabilité des agrégats ou pseudosables nécessiterait comme nous l'avons souligné au chapitre VI (paragraphe 22.2) un traitement plus énergique par les ultrasons.

Tableau X.1 : Comparaison des bilans massiques des modes de fractionnement

PRE-TRAITEMENTS	ANALYSE MECANIQUE H ₂ O ₂ et dispersant	TECHNIQUE N° 1 US F<200µm 15mn	TECHNIQUE N° 2 US F<200µm 5mn F<50µm 10mn	TECHNIQUE N° 3 US F<50µm 15mn
Nombre de répétitions		(1 mesure)	(3 mesures)	(3 mesures)
FRACTIONS				
2000/200 µm	30,4 %	28,6 %	27,5 %	29,6 %
200/50 µm	57,7 %	58,5 %	59,9 %	64,1 %
50/2 µm	4,3 %	5,5 %	6,7 %	3,7 %
< 2 µm	7,5 %	7,5 %	5,9 %	2,4 %

Tableau X.2*Comparaison des teneurs en carbone (%) en fonction du mode de fractionnement*

PRE-TRAITEMENTS*	TECHNIQUE N°1	TECHNIQUE N° 2	TECHNIQUE N° 3
	US F<200µm 5mn	US F<200µm 5mn F<50µm 10mn	US F<50µm 15mn
	C	C	C
2000/200 µm	0,61	0,48	0,58
200/50 µm	0,05	0,14	0,48
50/2 µm	4,78	4,17	3,66
< 2 µm	3,23	3,58	3,53

* : Temps d'application des ultra-sons (US) sur les fractions granulométriques inférieures à 200 et 50 µm

2.2 Les sols

Les échantillons proviennent des sites 1 et 2 et ils ont été prélevés dans les conditions définies au chapitre VI. Nous n'étudierons ici que les horizons 0-15 cm des sols sous forêt naturelle et sous palmeraie (PSC).

3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

3.1 Bilans en masse, carbone et azote.

Les résultats sont rassemblés dans les tableaux X.3. Tous échantillons confondus, les bilans en masse varient de 99,1 à 101,3 %, les bilans en carbone de 91 à 103 % et ceux en azote de 95 à 109 %.

L'importance pondérale des différentes fractions granulométriques est à peu près la même pour les sols sous forêt et sous plantations de palmiers à huile. La fraction sableuse grossière est dans les deux cas largement dominante. Par contre, on note une diminution légère mais significative de la fraction inférieure à 2 μm dans les sols sous palmiers.

3.2 Caractéristiques des fractions.

321. Caractéristiques morphologiques des fractions

L'observation à la loupe binoculaire a permis de caractériser sur le plan morphologique la fraction 2000/50 μm . Elle confirme les observations antérieures faites par FELLER *et al.*, (1983) et FRANCOIS (1988) sur les sols ferrallitiques argileux et sableux.

La fraction 2000/50 μm contient des débris végétaux figurés à structure organisée facilement reconnaissables à la loupe binoculaire. Ces débris végétaux présentent différents stades de décomposition plus ou moins identifiables.

Tableau X.3 : Teneurs et stocks de carbone dans les fractions granulométriques

SITE 1 : POBE	POIDS %		mgC/g fraction		mgC/g de sol		Effet de la culture		% C total		C/N	
Parcelle	F	PSC	F	PSC	F	PSC	ΔC	ΔC/C	F	PSC	F	PSC
2000/50 μm	88.6	87.6	9.59	2.90	8.50	2.50	6.00	78	57.0	34.6	12.3	15.3
50/2 μm	5.5	6.7	69.1	41.7	3.80	2.63	1.17	15	25.5	36.4	11.9	10.4
< 2 μm	7.2	5.9	36.7	35.8	2.60	2.08	0.52	7	17.5	28.8	7.3	8
Sol fractionné	101.3	100.2			14.9	7.21	7.69		100	100		
Sol non fractionné					16.4	7.20					12	12

SITE 2 : AKPADANOU	POIDS %		mgC/g fraction		mgC/sol		Effet de la culture		% C total		C/N	
Parcelle	F	PSC	F	PSC	F	PSC	ΔC	ΔC/C	F	PSC	F	PSC
2000/50 μm	90.2	93.0	7.5	3.03	6.75	2.82	3.93	5.48	50.2	44.9	12.5	18.9
50/2 μm	4.5	3.7	97.8	61.6	4.40	2.28	2.12	29.6	32.7	36.3	10.7	14.3
< 2 μm	4.4	2.4	52.2	49.2	2.30	1.18	1.12	15.6	17.1	18.8	8.8	10.7
Sol fractionné	99.1	99.1			13.45	6.28	7.17		100	100		
Sol non fractionné					14.40	6.10					11.3	15.3

F : Forêt

PSC : Palmeraie sol couvert au jeune âge

ΔC : Différence de teneur entre le sol forestier et le sol sous palmerie

Tableau X.4 : Teneurs et stocks d'azote dans les fractions granulométriques

SITE 1 : POBE	POIDS %		mgN/g fraction		mgN/g de sol		Effet de la culture		% N total	
Parcelle	F	PSC	F	PSC	F	PSC	ΔN	ΔN/N	F	PSC
2000/50 μm	88.6	87.6	0.78	0.19	0.69	0.17	0.52	76	50.7	25.0
50/2 μm	5.2	6.7	5.81	4.00	0.32	0.26	0.06	9	23.5	38.2
< 2 μm	7.1	5.9	5.0	4.5	0.35	0.25	0.10	15	25.7	36.8
Sol fractionné	101.3	100.2			1.36	0.68	0.68		100	100
Sol non fractionné					1.37	0.62				

SITE 2 : AKPADANOU	POIDS %		mgN/g fraction		mgN/g de sol		Effet de la culture		% N total	
Parcelle	F	PSC	F	PSC	F	PSC	ΔN	ΔN/N	F	PSC
2000/200 μm	90.2	93.0	0.60	0.16	0.54	0.15	0.39	49	50.2	44.9
50/2 μm	4.5	3.7	9.11	4.32	0.41	0.16	0.25	32	32.7	36.3
< 2 μm	4.4	2.4	5.91	4.58	0.26	0.11	0.15	19	17.1	18.8
Sol fractionné	99.1	99.1			1.21	0.42	0.79		100	100
Sol non fractionné					1.27	0.40				

F : Forêt
PSN : Palmeraie sol couvert au jeune âge
ΔN : Différence de teneur entre le sol forestier et le sol sous palmerie

Pour les fractions $< 50 \mu\text{m}$, non identifiables à la loupe binoculaire, les observations en microscopes optiques et électroniques des auteurs précités montrent que:

- la fraction $50/2 \mu\text{m}$ comprend des débris végétaux. On y retrouve aussi des débris fongiques et bactériens associés aux limons grossiers et aux limons fins et des microagréats stables qui ont résisté aux traitements aux ultrasons,
- la fraction inférieure à $2 \mu\text{m}$ comprend surtout de la matière organique amorphe et des débris microbiens associés aux minéraux argileux, aussi quelquefois, quelques fragments de parois végétales difficilement identifiables.

3.2.2 Composition chimique des fractions

Les teneurs en carbone (mgC g^{-1} de fraction), en azote (mgN g^{-1} de fraction) et le rapport C/N apparaissent aux tableaux X.3 et 4.

Les teneurs en carbone et en azote des fractions sont nettement plus élevées dans la fraction limoneuse et dans une moindre mesure dans la fraction argileuse des sols forestiers que dans les fractions sableuses sur les deux sites. Cependant, les différences des teneurs entre les fractions sableuses et les fractions limoneuses et argileuses sont nettement plus accusées sur ce site 1 que sur le site 2 particulièrement pour l'azote.

Avec la mise en culture, la diminution des teneurs en azote dans les fractions argileuses est très limitée particulièrement sur le site 1, ce qui laisse supposer que cette matière organique est stabilisée dans les complexes organo-minéraux; par contre les teneurs en C et N des fractions limoneuses et surtout sableuses décroissent fortement avec la mise en culture. On observe enfin une tendance à l'augmentation du rapport C/N des fractions grossières dans les sols sous palmeraie.

En résumé sur toutes les situations étudiées, on peut noter que :

- a) Les teneurs en C et N varient dans l'ordre Limons $>$ Argiles $>$ Sables. Cette hiérarchie n'est pas affectée par la mise en culture.

Figure X.1 : Stocks de carbone (mg C/g sol) dans les fractions granulométriques des échantillons de sol prélevés sous forêt (F) et sous palmeraie sol couvert (PSC) dans l'horizon 0-15 sur les sites 1 (Pobè) et 2 (Akpadanou)

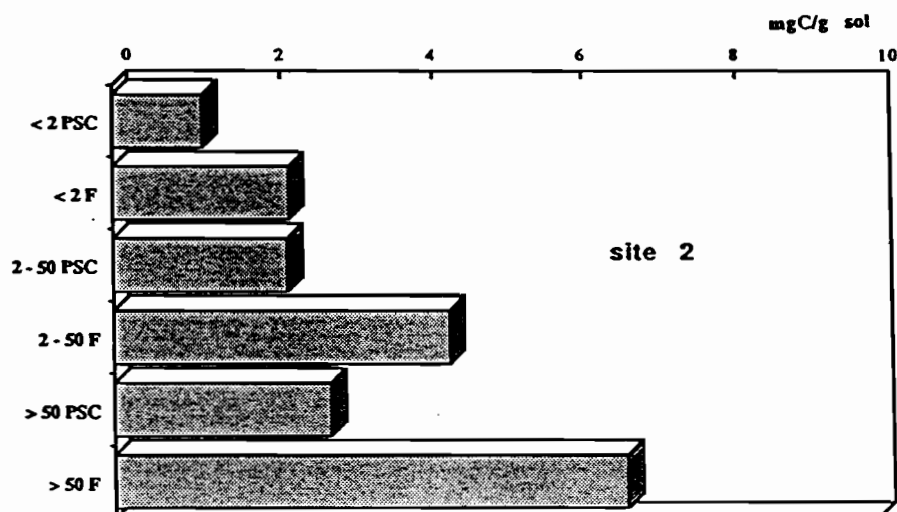
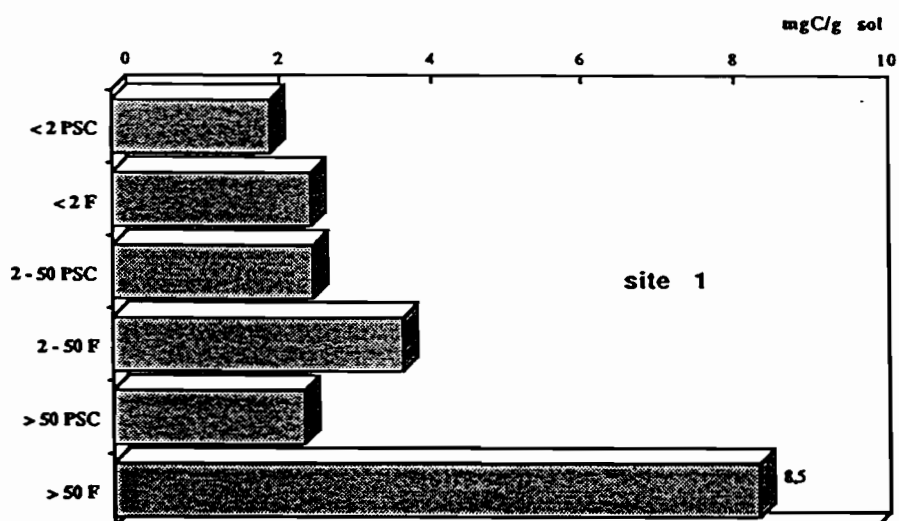
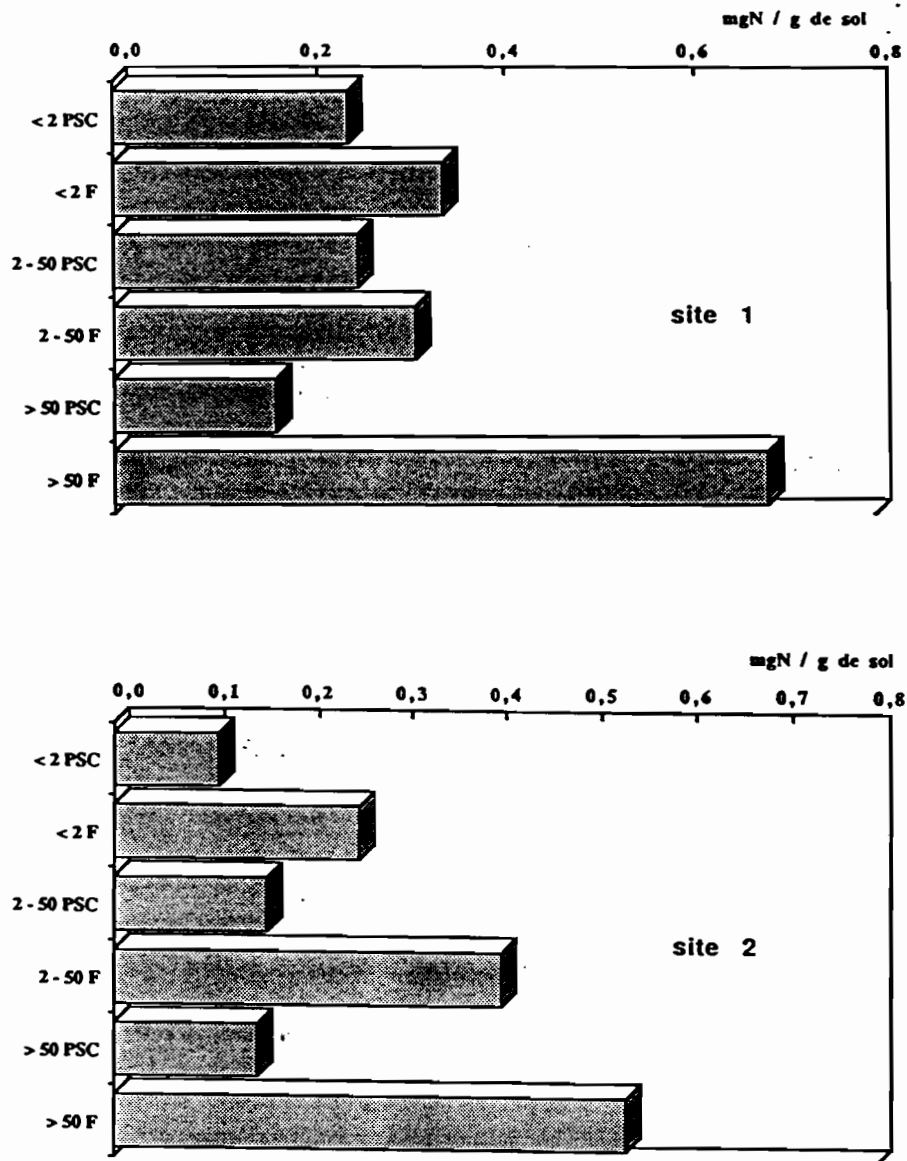


Figure X.2 : Stocks d'azote (mg N/sol) dans les fractions granulométriques des échantillons de sol prélevés sous forêt (F) et sous palmeraie sol couvert (PSC) dans l'horizon 0-15 sur les sites 1 (Pobè) et 2 (Akpadanou)



- b) Les rapports C/N permettent de caractériser les différentes fractions. Ils varient en effet de 12.3 à 18 pour la fraction supérieure à 50 μm , de 10 à 14 pour la fraction comprise entre 50 et 2 μm et enfin de 8 à 10 pour la fraction inférieure à 2 μm . Le rapport C/N diminue donc des fractions grossières aux fractions fines.

Cette dernière observation confirme les résultats antérieurs obtenus en milieu tempéré (CHICHESTER, 1969 ; McKEAGUE, 1971 ; HINDS et LOWE, 1980 ; ANDERSON *et al.*, 1981 ; TIESSEN et STEWART, 1983) et en milieu tropical (BERNHARD-REVERSAT, 1981 ; FELLER *et al.*, 1983 et 1991b et c ; CERRI *et al.* 1985).

La méthode de fractionnement physique utilisée a donc permis d'identifier des compartiments organiques et organo-minéraux morphologiquement et chimiquement différents. Quelle est l'influence de la mise en culture sur la distribution du carbone et d'azote entre les différentes fractions ?

3.3. Distribution du carbone et de l'azote dans les fractions : effet de la mise en culture

Sur les deux sites, la plus grosse partie du stock de carbone et d'azote est contenue principalement dans la fraction sableuse pour les sols forestiers (Tableaux X.3 et 4). La fraction (2000 / 50 μm) contient 57 et 50 % du carbone total du sol, la fraction (50 / 2 μm) 25 et 32 % et la fraction inférieure à 2 μm environ 17 % respectivement sur les sites 1 et 2. En ce qui concerne l'azote, les fractions prises dans le même ordre que précédemment contiennent 50, 23 et 25 % de l'azote total sur le site 1 et 50, 32 et 17 % sur le site 2. Les faibles teneurs relatives de la fraction argileuse s'expliquent par la faible importance pondérale de cette fraction fine dans ces sols sableux.

L'influence du passage à l'élevage sur le site 1 se traduit principalement par une baisse des stocks de matières organiques contenues dans la fraction sableuse (Figures X.1 et X.2). Par contre, les stocks de C et N contenus dans les fractions limoneuses et argileuses décroissent faiblement. Sur le site 2, la diminution du stock des matières organiques porte encore principalement sur la fraction sableuse mais les stocks de C et N contenus dans les fractions limon et argile décroissent plus nettement que sur le site 1

(Figure n° X.1 et X.2). Pour la fraction limoneuse, ceci est dû à une diminution effective des teneurs en C et N (mg/g de fraction) de la fraction et peu à leur poids. Pour la fraction argileuse, c'est beaucoup plus le fait des diminutions pondérales que des teneurs (en C et N) de la fraction. Le raisonnement serait à peu près identique pour le stock. Autrement dit, les processus de disparition de ces matières organiques avec la mise en culture diffèrent selon les fractions :

- pour les fractions supérieures à 2 μm (2-50 et 50-2000 μm), il y a une forte diminution des stocks organiques par minéralisation accélérée sous culture (avec faibles restitutions végétales): ce sont les variations des teneurs par gramme de fraction qui expliquent les différences observées.
- pour les fractions inférieures à 2 μm , il y a une faible diminution par appauvrissement sélectif en particules argileuses: ce sont les pertes en masse qui expliquent les différences et non pas les variations des teneurs en C et N (mg/g de fraction).

De manière globale, nous retiendrons que :

- les stocks de C ou de N par gramme de sol sous palmeraie dans ces deux sites diffèrent beaucoup moins fortement que sous forêt,
- l'élaéculture provoque une baisse relative des stocks de carbone et d'azote dans les fractions granulométriques de 50 à 76 % pour la fraction sableuse, 15 à 30 % pour la fraction limoneuse et seulement 7 à 19 % pour la fraction argileuse par rapport aux stocks sous forêt.

Dans une synthèse récente sur l'effet de la texture sur le stockage et la dynamique des matières organiques dans quelques sols ferrugineux et ferrallitiques FELLER *et al.*, (1991c) a également remarqué que dans les sols tropicaux *sableux*, les variations des stocks des matières organiques à la suite de la mise en culture sont essentiellement liées à la variation des stocks organiques dans les fractions grossières. Ces résultats s'expliquent par les observations faites in situ sur la dynamique des matières organiques liées à chaque fraction par MARTIN *et al.*, 1990 d'une part, BALESSENT *et al.*, (1987,1988) d'autre part grâce à l'utilisation des techniques isotopiques basées sur la mesure des abondances naturelles en ^{13}C des matières organiques des sols . Leurs résultats indiquent en effet,

que dans les sols sableux, le taux de renouvellement des débris végétaux associés aux sables grossiers et fins est plus élevé que celui des matières organiques liées aux limons et aux argiles. Les débris figurés plus ou moins humifiés de cette fraction grossière paraissent en grande partie biodégradables lors de la mise en culture. Ils constituent le compartiment organique le plus important dans l'horizon supérieur sableux de ces sols, mais c'est également le compartiment organique qui varie le plus sous l'influence du système de culture.

Cet ensemble de résultats sur lesquels nous reviendrons, montre l'importance qu'il y a à maintenir le niveau des restitutions végétales dans les agrosystèmes sur sols sableux dont plus de la moitié des matières organiques de l'horizon supérieur des sols est stockée dans une fraction granulométrique grossière, sous une forme relativement labile.

Les statuts organiques des sols rouges ferrallitiques sur terres de barre, soumis à différents systèmes de culture ont été comparés aux stocks organiques existant dans les mêmes sols sous forêt dense semi-décidue (F).

Ces comparaisons ont été réalisées sur trois sites en position topographique analogue et sur des sols appartenant au même groupe qui se différencient seulement par la texture du matériau originel et l'appauvrissement en argile plus ou moins marqué des horizons humifères.

Dans chacun des trois sites retenus, nous avons pu comparer les profils cultureux et prélever des échantillons de sols représentatifs afin d'évaluer les stocks organiques dans des sols analogues différents seulement par leur passé cultural: plantation d'essences forestières (PF), plantation de palmiers à huile conduite au jeune âge avec une couverture de légumineuses dans les interlignes (PSC) ou sans couverture du sol (PSN), cultures vivrières (CV).

La comparaison des profils organiques dans ces différents agrosystèmes a confirmé la baisse dramatique des teneurs en carbone et en azote par rapport à celle observée dans les écosystèmes forestiers. Cette baisse des stocks organiques est surtout sensible dans les horizons supérieurs sableux. Sur le site 2 par exemple, dans les 35 premiers centimètres, la diminution du stock d'azote par rapport au sol forestier est de 72 % pour PSN, 65% pour PSC, 55% pour CV.

L'inégale répartition des stocks organiques dans les sols cultivés a été quantifiée en tenant compte de l'hétérogénéité des parcelles élémentaires due aux façons culturales sous cultures vivrières (billons et interbillons) et dans les sols sous plantations de palmiers à huile (andains qui reçoivent les palmes élaguées, interlignes et ronds autour des arbres) :

- pour les cultures vivrières, l'enfouissement des résidus végétaux des cultures précédentes et des adventices et la technique de préparation du billon provoquent une

augmentation significative des teneurs en matière organique dans le billon par rapport aux sols de l'interbillon ; par contre, les teneurs en matière organique sous le billon ne sont pas plus élevées que dans la couche supérieure de l'interbillon ; cela est dû au déplacement du billon tous les ans

- dans les parcelles sous palmiers à huile, les teneurs en matière organique sous andains illustrent localement l'influence des restitutions végétales localisées sur le statut organique des sols. Cependant, les teneurs en matière organique des sols sous andains restent inférieures aux teneurs moyennes observées dans les parcelles forestières. L'accumulation en "tas" des feuilles d'élagage dans les andains et leur faible contact avec la matière minérale du sol semble limiter les possibilités d'intégration de ces résidus végétaux et de stabilisation des produits issus de la biodégradation des matières organiques. Ces prélèvements tenant compte de l'hétérogénéité spatiale liées aux techniques culturales utilisées, nous ont donc permis d'estimer avec plus de précision les stocks organiques moyens contenus dans les parcelles élémentaires sous plantation de palmiers à huile et sous cultures vivrières.

Sur les trois sites étudiés, le classement des stocks de carbone restant dans les horizons humifères de surface s'établit comme suit en fonction des systèmes de culture: $F > PF > CV > PSC > PSN$. Ce classement suscite les remarques suivantes :

- en une vingtaine d'années, la régénération de 60 % (site 2) et 80 % (site 3) du stock organique mesuré sous forêt par la pratique d'une sylviculture (Cassia ou Teck) montre l'intérêt de ce type de jachère aménagée,
- les effets résiduels de la couverture du sol des interlignes au jeune âge des palmeraies restent encore marquées après plus de vingt ans ; les teneurs en matières organiques de la couche (0 - 15 cm) sous palmeraie sol couvert dépasse en moyenne sur les sites 1 et 2 de 45 % pour l'azote et de 25 % pour le carbone les teneurs observées dans les interlignes gardés nu (PSN) au jeune âge. La baisse relative des teneurs en éléments fins sous PSN par rapport à PSC sur les deux sites laissent penser qu'il y a une "érosion sélective" des fines (argile et matière organique) plus importante sous PSN au cours des premières années.

Par ailleurs, on s'aperçoit que la diminution des stocks organiques dans les sols cultivés est d'autant plus importante que les horizons humifères sont plus sableux. Toutefois, toutes situations forestières et cultivées confondues, la corrélation entre le stock d'éléments fins (argile + limons) et le stock de matières organiques dans la couche 0-35 cm n'est pas significative. Cependant sur le site 1, la diminution des stocks organiques entre les sols forestiers et les sols cultivés est plus faible que sur les deux autres sites. La richesse en éléments fins un peu plus importante sur ce site 1 a donc favorisé une certaine stabilisation des matières organiques à un niveau d'équilibre dynamique plus élevé.

Cette importante baisse de la matière organique (C et N) se traduit par une diminution importante des formes d'azote les plus labiles comme en témoignent les teneurs de l'azote potentiellement minéralisable (No) beaucoup plus faibles sous cultures que sous forêt. Il existe une corrélation très hautement significative entre l'azote total et l'azote potentiellement minéralisable. Une expérimentation en serre avec ray-grass confirme d'ailleurs la diminution de la "fertilité azotée du sol" à la suite de la mise en culture et, en particulier, la faible disponibilité de l'azote qui s'exprime à la fois au niveau des rendements des parties aériennes et des quantités d'azote prélevées. Le classement des sols sous forêt et sous palmiers à huile du point de vue de la disponibilité de l'azote est le même que celui obtenu par l'évaluation de l'azote minéralisable. Toutefois, l'apport d'une solution minérale (sans azote) montre que l'azote absorbé par la plante-test s'accroît notablement pour les sols sous palmiers, ce qui traduit l'existence d'interactions entre l'effet de la fertilisation minérale et l'assimilation de l'azote du sol compte tenu d'un état donné des réserves minérales du sol.

Nous avons donc cherché à identifier par différentes approches (hydrolyse acide, hydrolyse alcaline, fractionnement granulométrique de la matière organique) les formes d'azote labiles.

Le fractionnement par hydrolyse acide des composés azotés contenus dans ces sols cultivés montre que les teneurs absolues (mg/g de sol) des trois fractions (NHD, NHnD et NnH) sont très fortement corrélées aux teneurs en azote total. Elles diminuent donc à peu près dans les mêmes proportions que l'azote total. La fraction hydrolysable non distillable dite "aminée" (NHnD) qui est la plus importante en valeur absolue est celle qui diminue le plus, suivie de la fraction hydrolysable distillable dite "ammoniacale" (NHD);

la fraction non hydrolysable (NnH) qui serait constituée par des complexes hétérocycliques, donc des formes théoriquement assez stables de l'azote diminue également aussi dans les horizons humifères de ces sols cultivés, particulièrement dans les sols les plus sableux (site 2 et 3). Lorsque l'on examine les relations existant entre ces trois fractions azotées et l'azote potentiellement minéralisable, on constate que toutes les fractions sont étroitement corrélées entre elles. Pour ces sols sableux sur terres de barre, cette méthode de fractionnement chimique relativement longue et délicate apporte donc peu d'indications sur les compartiments azotés minéralisables. Par contre, le rapport de l'azote protéique à l'azote dit "ammoniacal" ($NHnD/NHD$) diminue d'une manière plus ou moins marquée avec la mise en culture et avec la profondeur. Ce rapport est considéré par EGOUMENIDES *et al.*, (1987) comme un paramètre indiquant la susceptibilité à la minéralisation de l'azote organique des sols. Toutefois, les variations de ce rapport sont mieux expliquées lorsque l'on tient compte à la fois de la teneur en azote total et en argile des échantillons. Il ne peut donc être utilisé comme un indice de fertilité que localement, sur des sols à texture strictement analogue. Il existe effectivement une liaison significative entre $NHnD/NHD$ et le potentiel de minéralisation No , mais l'intensité de cette liaison est plus faible que celle entre No et $Ntotal$ ou No et chacune des fractions séparées.

L'"azote potentiellement disponible" évalué par hydrolyse alcaline diminue très fortement dans l'horizon de surface en fonction des systèmes de culture. Les quantités d'azote obtenues par cette méthode d'hydrolyse sont corrélées aux teneurs en azote total, aux différentes fractions azotées obtenues par hydrolyse acide, particulièrement aux fractions hydrolysables distillables (NHD) et non distillables ($NHnD$) et à l'azote potentiellement minéralisable (No).

Le fractionnement granulométrique par tamisage humide et dispersion par les ultrasons des échantillons provenant de l'horizon humifère de surface montre que ce sont principalement les matières organiques contenues dans les fractions grossières ($> 50 \mu m$) et secondairement, celles des fractions $2-50 \mu m$ de ces sols cultivés qui ont diminué au cours des cultures. Par contre, les matières organiques contenues dans la fraction argileuse ont peu varié. Ces dernières paraissent donc relativement stables mais leur contribution au stock total de carbone et d'azote organique de ces sols sableux est faible ($< 30 \%$).

Ces différents systèmes de culture, pratiqués sur terre de barre dans le Sud du Bénin avec des apports limités d'engrais azotés ou d'amendements organiques et des exportations des récoltes, et d'une partie importante des résidus de culture, aboutissent très rapidement non seulement à une diminution importante du stock d'azote total dans ces sols mais aussi à une réduction proportionnellement plus grande de l'azote minéralisable ou disponible pour la plante.

Dans ces sols cultivés, les variations du compartiment azoté potentiellement minéralisable n'apparaissent pas préférentiellement liées aux variations de l'une ou l'autre des trois fractions azotées hydrolysables. Les corrélations très étroites qui existent entre ces trois fractions azotées et les teneurs totales en azote font que la variable explicative la plus pertinente pour décrire les variations de l'azote potentiellement minéralisable dans ces sols sableux est tout simplement la teneur en azote total.

Ceci paraît être la conséquence de la faible importance et de la relative stabilité des matières organiques associées aux fractions argileuses des horizons humifères de ces sols sableux; l'azote associé aux fractions sableuses sous forme de débris végétaux est par contre largement prépondérant et subit l'essentiel des modifications dues aux systèmes culturels. On pourrait donc considérer en première approximation, que les matières organiques azotées labiles, et qui ont disparu avec la mise en culture, dans l'échelle de temps considérée (la décennie) sont essentiellement celles qui étaient associées aux débris végétaux $> 50 \mu\text{m}$ sous forêt. Des potentiels de minéralisation, au laboratoire, sur les différentes fractions granulométriques pourraient permettre de vérifier cette hypothèse. Soulignons toutefois qu'il ne s'agit que de dynamiques "apparentes" car, à des échelles de temps courtes, de l'ordre du mois, divers auteurs (CHICHESTER, 1969; CAMERON et POSNER, 1979; BERNHARD-REVERSAT, 1981) ont montré qu'une proportion non négligeable, voire importante de l'azote minéralisable est associé aux fractions argileuses, probablement sous forme de biomasse microbienne.

La correction de cette baisse de fertilité azotée due aux systèmes de cultures passe, dans ces sols sableux, par une nécessaire remontée du stock d'azote total ou son maintien à un niveau optimal. Quelles sont donc les diverses stratégies envisageables selon les systèmes de culture considérés et leur durée? On distinguera la gestion au niveau parcellaire et celle au niveau du terroir :

a) la gestion parcellaire

Nous prendrons deux exemples, celui des palmeraies et celui des cultures vivrières :

- **Palmeraie:** Nous avons vu qu'à long terme, et en ce qui concerne les propriétés des sols le système PSC est meilleur que le système PSN. Le système PSC est donc à préconiser même si pendant les premières années de cultures les rendements sont sensiblement inférieurs au PSN sans doute pour des raisons de concurrence hydrique. Nous n'avons pas de données concernant les rendements à plus long terme. Il serait donc souhaitable de poursuivre cette étude dans ce sens. De plus, il semble que l'on doit *a priori* éviter de replanter sur les terres de barre de la série sableuse dont les stocks organiques, les ressources en azote et la capacité de rétention en eau sont fortement amoindries par la culture.
- **Cultures vivrières:** Toutes pratiques favorisant l'apport de débris végétaux au sol est *a priori* intéressante. Aussi, on peut proposer la culture en couloirs ou "alley cropping" (LAL et KANG, 1982) qui associe cultures vivrières et légumineuses arbustives. Mais compte tenu de la pluviosité souvent insuffisante du Sud-Bénin, des expérimentations préalables sont nécessaires pour tester les espèces de légumineuses les plus intéressantes, vérifier la reconstitution du stock d'azote, apprécier la concurrence hydrique avec les cultures réalisées dans les allées et *la rentabilité du système en parcelles paysannes pilotes sur des terres remembrées.*

b) la gestion au niveau du terroir

L'état de dégradation de ces sols et la "savanisation" du milieu ne permettent généralement pas à des friches de se transformer spontanément en jachère forestière. De plus, cette lente régénération des terres par la jachère forestière ne peut être adoptée que si cette pratique s'accompagne d'une certaine rentabilité. L'exemple des plantations de teck montre qu'il est possible de relever le niveau organique de ces sols à un niveau

comparable à celui des forêts secondaires anciennes, tout en rentabilisant cette "jachère forestière aménagée".

Enfin, de manière générale, compte tenu des conditions climatiques du Sud-Bénin, les contraintes hydriques limitent non seulement les récoltes, mais aussi la production de biomasse végétale qui pourrait permettre de relever le statut organique de ces sols. L'étude de l'alimentation azotée des cultures sur terres de barre ne peut donc être dissociée de la satisfaction des besoins en eau des cultures. Il est donc probable que l'amélioration des systèmes de culture pratiqués au Sud du Bénin passe par l'étude des interactions entre l'alimentation hydrique et l'alimentation azotée des cultures; mais ceci est tout un programme qui reste à mieux définir et à entreprendre.

- ADDISCOTT (T.M.)**, 1983. - Kinetics and temperature relationships of mineralisation and nitrification in Rothamsted soils with differing histories. *Journal of Soil Science*, 34: 343 - 353.
- AGARWAL (A.S.), SINGH (B.R.), and KANEHIRO (Y.)**, 1970. - Soil nitrogen and carbon mineralization as affected by drying - rewetting cycles. *Soil. Sci. Soc. Am. Proc.*, 35: 96 - 100.
- AKOAGNINO (A.)**, 1984. - Contribution à l'étude botanique des îlots de forêts denses humides semi - décidues en République Populaire du Bénin. *Thèse de 3ème cycle, Université de Bordeaux III*, 250p
- AL ZAHAWI (F.)**, 1976. - Evolution de la fertilité d'un sol ferrallitique de Côte - d'Ivoire en condition de culture intensive. Effet de la fumure azotée et d'un amendement organique. *Thèse de 3ème cycle, Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier*, 103 p. et annexes.
- ALLISON (F.E.)**, 1973. - Soil organic matter and its role in crop production. *Development in soil science 3*. Elsevier Science Publishing Co, New-York, 637 p.
- ANDERSON (D.W.), SAGGAR (S.), BETTANY (J.R.) and STEWART (J.W.B.)**, 1981. - Particle size fractions and their use in studies of soil organic matter: I The nature and distribution of forms of Carbon , Nitrogen, and Sulfur. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 45: 767-772.
- BALESDENT (J.), MARIOTTI (A.) and GUILLET (B.)**, 1987. - Natural carbon - 13 abundance as a tracer for studies of soil organic matter dynamics. *Soil Bio. Biochem.*, 19: 25 - 30.
- BALESDENT (J.), WAGNER (G.H.) and MARIOTTI (A.)**, 1988. - Soil organic matter turnover in long - term field experiments as revealed by carbon - 13 natural abundance. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 52: 118 - 124.

- BENARD (G.). et DANIEL (C.), 1971.** - Economie de l'eau en jeunes palmeraies sélectionnées du Dahomey. Castration et sol nu. *Oléagineux*, 26 (4): 225-232
- BERNHARD - REVERSAT (F.), 1981.** - Participation of light and organo - mineral fractions of soil organic matter in nitrogen mineralization in a sahelian savanna soil. *Zbl. Bakt, II Abt.*, 136: 281 - 290.
- BIRCH (H.F.), 1960.** - Nitrification in soils after different periods of dryness. *Plant Soil*, 12: 81 - 96.
- BOISSEZON (P. de), 1973.** - Les matières organiques des sols ferrallitiques . In: "*Les sols ferrallitiques*", T. I, pp. 9 - 66. P. de Boissezon, C Mourreaux, G. Bocquel, G. Bachelier, Eds., I.D.T. 21, ORSTOM, Paris, 146 p.
- BONDE (T.A.) and ROSSWALL (T.), 1987.** - Seasonal variation of potentially mineralisable nitrogen in four cropping systems. *Soil Sci. Soc. of Am J.*, 51: 1508 - 1514.
- BOYER (J.), 1982.** - Les sols ferrallitiques. Facteurs de fertilité et utilisation des sols. Tome X. Eds., I.D.T. 52, ORSTOM, Paris, 384 p.
- BREMNER (J.M.), 1967.** - Nitrogenous compounds. In *Soil Biochemistry* (A.D. McLaren and G.H. Peterson. Eds), pp 32 - 66
- BREMNER (J. M.), 1982.** - Advances in methodology for research on nitrogen transformation in soils. In: Nitrogen in agricultural soils, edited by Stevenson. *Agronomy monograph* n°22: 467 - 493
- BRUCKERT (S.) et KILBERTUS (G.), 1980.** - Fractionnement et analyse des complexes organo - minéraux de sols bruns et de chernozems. *Plant and soil*, 57: 271 - 295.

BULLOCH (P.) ; FEDOROFF (N.) ; JONGERIUS (A.) ; STOOPS (G.) and TURISIN (T.), 1985. - Handbook for soil thin section description. Waine Research Publications, 152 p.

CABRERA (M.L.) and KISSEL (D.E.), 1988. - Potentially mineralizable nitrogen in disturbed and undisturbed soil samples. *Soil Sci. Soc. Am J.*, 52: 1010-1015.

CAMPBELL (C.A.) and SOUSTER (W.), 1982. - Loss of organic matter and potentially mineralizable Nitrogen from Saskatchewan soils due to cropping. *Can. J. Soil Sci.*, 62: 651-656.

CASSMAN (K.G.) and MUNNS (D.N.), 1980. - Nitrogen mineralization as affected by soil moisture, temperature and depth. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44: 1233-1237

CERRI (C.), FELLER (C.), BALESDENT (J.), VICTORIA (R.) et PLENECASSAGNE (A.), 1985. Application du traçage isotopique naturel en ^{13}C à l'étude de la dynamique de la matière organique dans les sols. *C. R. Acad. Sci., Paris*, Sér. n° 9: 423 - 428.

CHAMINADE (R.), 1965. Bilan de trois années d'expérimentation en petits vases de fégétation. Mise au point technique. Résultats. *Agron. Trop.* XX (11) : 1101-1162

CHAUVEL (A.), 1977. - Recherches sur la transformation des sols ferrallitiques dans la zone tropicale à saisons contrastées. Evolution et réorganisation des sols rouges de moyenne Casamance. Trav. Doc. ORSTOM (Paris) n° 62, 532 p

CHIECHESTER (F.W.), 1969. - Nitrogen in soil organo - mineral sedimentation fractions. *Soil Sci.*, 107: 356 - 363.

- CORNFORTH (I.S.)**, 1968. - The potential availability of organic nitrogen fraction in some West Indian soils. *Exp. Agric.*, 4: 193 - 201.
- CPCS**, 1967. - Classification des sols . Rapp. ENSA GRIGNON, 87 p., multigr.
- CRASWELL (E.T.) and WARING (S.A.)**, 1972. - Effect of grinding on the decomposition of soil organic matter. The mineralization of organic nitrogen in relation to soil type. *Soil Biol. Biochem.*, 4: 427 - 433.
- DABIN (B.)**, 1956. - Contribution à l'étude de la fertilité des terres de barre. *Agron. trop.*, 11(4): 490-506.
- DANIEL (C.)**, 1986. - Le palmier à huile au Bénin. Recherche agronomique et développement. Situation 1984-1985; perspectives d'avenir. Doc. IRHO, n° 1988 et 1988 bis.
- DANIEL (C.) et de TAFFIN (G.)**, 1974. - Conduite des jeunes plantations de palmier à huile en zones sèches au Dahomey. *Oléagineux*, 20 (5): 227 - 232
- DEANS (J.R.), MOLINA (J.A.E.) and CLAPP (C.E.)**, 1986. - Models for predicting potentially mineralizable nitrogen and decomposition rate constante. *Soil Sci. Soc. Am J.* 50 (2): 323 - 326.
- DECAU (J.)**, 1968. - Contribution à l'étude de l'influence des conditions du milieu sur la répartition de l'azote dans le sol. I. Principales formes obtenues par hydrolyse. *Ann. Agrono.*, 19: 653 - 683
- DEVINEAU (J.L.)**, 1973. - Données préliminaires sur la litière et la chute des feuilles dans quelques formations forestières semi - décidues de moyenne Côte - d'Ivoire. *Oecologica Plantarum*, 11(4): 375 - 395.
- DJEGUI (N.)**, 1982. - Essai de caractérisation de l'état de dégradation des terres de barre. IRAT-CIRAD (Montpellier), 35 p, multigr.

- DORAN (J.W.)**, 1980. - Soil microbial and biochemical changes associated with reduced tillage. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44: 765 - 771.
- DUXBURY (J.M.), SMITH (M.S.) and DORAN (J. W.)**, 1989. - Soil organic matter as a source and a sink of plant nutrients. In: *Dynamics of soil organic matter in Topical ecosystems* pp 33-67
- EGOUMENIDES (C.), RISTERUCCI (A.) et MELEBOU (K.E.)**, 1987. - Appréciation de la fertilité azotée des sols tropicaux: étude des fractions organiques de l'azote. *Agron. Trop.*, 42: 85 - 93.
- EI-HARRIS (M.K.), COCHRAN (V.L.), ELLIOT (L.F.) and BEZDICEK (D.F.)**, 1983. - Effect of tillage, cropping and fertilizer management on soil nitrogen mineralization potential. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 47: 1157 - 1161.
- FAO-UNESCO**, 1989. - Carte mondiale des sols. Légende révisée. *Rapport sur les ressources en sols du monde* n° 60, FAO (Rome), 125p.
- FAUCK (R.), MOUREAUX (C.R.) et THOMANN (C.)**, 1969. - Bilans de l'évolution des sols de Séfa (Casamance, Sénégal) après quinze années de culture continue. *Agron. Trop.*, 3: 263-301.
- FAUCK (R.)**, 1972. - Les sols rouges sur sables et sur grès d'Afrique Occidentale. Mém. ORSTOM (Paris) n°61, 257 p.
- FELLER (C.)**, 1979. - Une méthode de fractionnement granulométrique de la matière organique des sols. Application aux sols tropicaux à texture grossière très pauvre en humus. *Cah.ORTOM ser .Pedol XVII(4)*, 339-346.
- FELLER (C.), BERNHARDT-REVERSAT (F.), GARCIA (J.L.), PANTIER (J.J.), ROUSSOS (S.) et VAN VLIET-LANOE (B.)**, 1983. - Etude de la matière organique de différentes fractions granulométriques

d'un sol sableux tropical. Effet d'un amendement organique (compost). *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol XX, n°3: 223 - 238.

FELLER (C.), FRANCOIS (C.), VILLEMIN (G.), PORTAL (J.M.), TOUTAIN (F.) et MOREL (J.L.), 1991a. - Nature des matières organiques associées aux fractions argileuses d'un sol ferrallitique. *C.R. Acad. Sci. Paris*, t.312, Série II, p. 1491-1497.

FELLER (C.), FRITSCH (E.), POSS (R.) et VALENTIN (C.) 1991b. - Effet de la texture sur le stockage et la dynamique des matières organiques dans quelques sols ferrugineux et ferrallitiques (Afrique de l'Ouest, en particulier). *Cah. ORSTOM. Ser. Pedol.*, 1991, sous presse.

FELLER (C.), BURTIN (G.), GERARD (B.) et BALESDENT (J.), 1991c. - Utilisation des résines sodiques et des ultrasons dans le fractionnement granulométrique de la matière organique des sols. Intérêt et limites. *Science du sol*

FRANCOIS (C.), 1988. - Devenir à court terme de différentes formes d'azote (urée, végétaux, sol) dans un ferrisol (Martinique). Caractérisation de N - organique par fractionnement granulométrique. Etude avec ^{15}N . Thèse Doctorat, Université Nancy I, 135 p + Annexes.

GIANELO (C.) and BREMNER (J.M.), 1986a. - A simple chemical method of assessing potentially available organic nitrogen in soil. Commun. in *Soil Sci. Plant Anal.*, 17 (2): 195 - 214.

GIANELO (C.) and BREMNER (J.M.), 1986b. - Comparison of chemical methods of assessing potentially available organic nitrogen in soil. Commun. in *Soil Sci. Plant Anal.*, 17 (2): 215 - 236.

GIANELO (C.) and BREMNER (J.M.), 1988. - A rapid steam distillation method of assessing potentially available organic nitrogen in soil. Commun. in *Soil Sci. Plant Anal.*, 19 (14): 1551 - 1568.

GOH (K.M.) and EDMEADES (D.C.), 1979. - Distribution and partial characterization of acid hydrolysable organic nitrogen in six New - Zealand soils. *Soil Biol. Biochem.*, (11): 127 - 132.

GRIFFIN (G.F.) et LAINE (A.F.), 1983. - Nitrogen mineralization in soils amended with organic wastes. *Agron J.*, 75: 124.

HARTMANN (C.), 1991. - Evolution et comportement des sols sablo - argileux ferrallitiques sous culture de palmiers à huile. Cas de la plantation R. MICHAUX à DABOU (Côte - d'Ivoire). Thèse de Doctorat de l'Université de Paris VI.

HINDS (A.A.) and LOWE (L.E.), 1980. - Distribution of carbon, nitrogen sulfur and phosphorus in particle size - separates from gleysolic soils. *Can. J. Soil Sc.*, 60: 783 - 786.

HIURA (K.), HATTORI (T.) and FURUSAKA (C.), 1976. - Bacteriological studies on the mineralization of organic nitrogen in paddy soils. I. Effects of mechanical disruption of soil in ammonification and bacterial number. *Soil Sci. Plant Nutr.* (Tokyo), 22: 459 - 465

HUMBEL (F.X), MULLER (J.P.) et RIEFFEL (J.M.), 1977. - Quantités de matières organiques associées aux sols du domaine ferrallitique au Cameroun. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. XV, n°3 : 259-274.

HUNTJENS (J.L.M.), 1972. - Amino - acid composition of humic - acid - like polymers produced by streptomycetes and of humic acid from pasture and arable land. *Soil Biol. Biochem.*, (4): 339 - 345.

IRHO (1964). - Plan Palmier à Huile. Etudes de base. Annexe I. 55 pp

JANEL (P.), JOCTEUR - MONROZIER (P.) et TOUTAIN (F.), 1979. - Caractérisation de l'azote des litières et des sols par hydrolyse acide. *Soil Biol. Biochem.*, (11): 141 - 146.

- JANSSON (S.L.)**, 1958. - Tracer studies on nitrogen transformation in soil with special attention to mineralization - immobilization relationships. *Annals of the Royal Agriculture College*, Sweden, 24: 101 - 361.
- KANG (B.T.)**, 1977. - Effect of some biological factors on variability in the tropics.2. Effect of oil palm tree (*Elaeis guineensis* Jacq). *Plant Soil*, 47: 451-462.
- KEENEY (D.R.) and BREMNER (J.M.)**, 1966. - Characterization of mineralisable nitrogen in soil. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 30: 714 - 719.
- KHAN (S.U.) and SOWDEN (F.J.)**, 1971. - Distribution of nitrogen in the black solonetzic and black chernozemic soils of Alberta. *Can. J. Soil Sci.*, 51: 185-195.
- LAL (R.) and KANG (B.)**, 1982. - Management of organic matter in soils of the tropics and sub - tropics. In: Non - Symbiotic Nitrogen Fixation and organic matter in the Tropics. *Trans 12 th. Internat. Congr. Soil Sci.* (New - Delhi 8 - 16 fev 1982) p: 153 - 178.
- LOMBAERT (V.)**, 1987. - Micro - Cultures. Méthodes Stanford - de Ment. In: *Les dossiers agronomiques d'Aspach le Bas*, n°2: 59 - 86.
- LUGO (A.E.), SANCHEZ (M.J.) and BROWN (S.)**, 1986. - Land use and organic carbon content of some sub-tropical soils. *Plant and soil*, 96 : 185-196.
- MADGE (D.S.)**, 1965. - Litter fall and litter disappearance in a tropical forest. *Pedobiologia*, 9 : pp 288 - 299.
- MARION (G.M.) KUMMEROW (J.) and MILLER (P.C.)**, 1981. - Predicting nitrogen mineralization in Chaparral soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 45: 956 - 961.
- MARTIN (A.), MARIOTTI (A.), BALESDENT (J.), LAVELLE (P.) and VUATTOUX (R.)**, 1990. - Estimate of organic matter turnover rate in a

savanna soil by ^{13}C natural abundance measurements. *Soil Biol. Biochem.*, 22: 517 - 523.

MARTIN (J.P.) and HAIDER (K.), 1986. - Influence of mineral colloid on turnover rates of soil organic carbon. *Soil Sci. Soc. Am. J. Spec. Pub.* n°17, 283-303

MARY (B.) et REMY (J.C.), 1979. - Essai d'appréciation de la capacité de minéralisation de l'azote des sols de grande culture. I: - Signification des cinétiques de minéralisation de la matière organique humifiée. *Ann. Agron.*, 30 (6): 513 - 527.

Mc KEAGUES (J.A.), 1971. - Organic matter in particle size and specific gravity fractions of some Ah horizons. *Can. J. Soil Sci.*, 51: 499 - 505.

METCHE (M.) et ANDREUX (F.), 1974. - Etude de la distribution des groupes carboxyliques et aminés dans la phytomélanine de *Juglans regia*. *C.R. Acad. Sci. Paris, Série D*, 279 (12): 1035 - 1038.

MILLER (R.D.) and JONSHON (D.D.), 1964. - The effect of soil moisture tension on carbon dioxide evolution, nitrification, and nitrogen mineralization. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 28: 644 - 647.

MOLINA (J.A.E.) CLAPP (C.E.) and LARSON (W.E.), 1980. - Potentially mineralizable nitrogen in soil: The simple exponential model does not apply for the first 12 weeks of incubation. *Soil Sci. Soc. Am J.*, 44: 442 - 444.

MONROZIER (J.L.) et ANDREUX (F.), 1981. - L'azote organique des sols, exemple de quantification des formes protéiques et des combinaisons complexes. *Bull. A.F.E.S.*, (3): 219 - 242.

MONROZIER (J.L.) et JEANSON (P.), 1981. - Caractères généraux et évolution de l'azote organique dans les sédiments superficiels. In: *Géochimie organique des*

sédiments marins profonds. Orgon IV - Golfe d'Aden, Mer d'Oman. CNRS - Paris Publ., 503 - 526.

MOORE (A.W.) and RUSSELL (J.S.), 1970. - Changes in chemical fractions of nitrogen during incubation of soil with histories of large organic matter increase under pasture. *Aust. J. Soil Res.*, 8 (1): 21 - 30.

NYE (P.H.), 1961. - Organic matter and nutrient cycle under moist tropical forest. *Plant and Soil*, 13: 333 - 346.

OLSON (B.M.) and LOWE (L.E.), 1990. - Effect of intensive vegetable production on the hydrolysable carbon, nitrogen and sulfur of a British Columbia humisol. *Can. J Soil Sci.* 70: 621 - 628.

OSBORNE (G.J.), 1977. - Chemical fractionation of soil nitrogen in six soil from southern New South Wales. *Aust. J. Soil Res.* 15: 159 - 165.

PERRAUD (A.), 1970. - Note sur les différents types d'humus des sols ferrallitiques forestiers de la Côte-d'Ivoire. *C.R. Acad. Sc. Paris*, t. 270, p.1302-1305.

PFEIFFER (V.), 1988. - Agriculture au Sud - Bénin. Passé et perspectives. 172 p

POSS (R.) et SARAGONI (H.), 1987. - Calage du cycle cultural du maïs et zonage pédoclimatique au Togo méridional. *ORSTOM - IRAT - DRA*, Lomé, 10p

PROCTOR (J.), 1984. - Tropical litterfall II. The data set. In: Tropical rain forest. The Leeds Symposium. *Leeds Philosophical and Literary Society*. 83 - 113

PROJET / PNUD / FAO / BEN, 1977. - Structure des exploitations traditionnelles de la R.P. du Bénin (campagne agricole 76 - 77) 237 p.

QUENCEZ (P.), 1988. - Evolution et structure des sols en palmeraie. Identification des problèmes au Bénin. *Rapp. CIRAD / IRHO*, multigr, 19

ROOSE (E.J.), 1970 - Importance relative de l'érosion, du drainage oblique et vertical dans la pédogénèse d'un sol ferrallitique de moyenne Côte d'Ivoire. *Cah. ORSTOM, Sér. Pédol.* 8(4) : 469-482.

SANCHEZ (P.A.), 1973. - Soil management under shifting cultivation. In: A review of soils research in tropical Latin America, *Tech. Bul.* n° 219, 46 - 67

SANCHEZ (P.A.), GICHURU (M.P.) and KATZ (L.B.), 1982. - Organic matter in major soils of Tropical and Temperate regions. In: Non - Symbiotic Nitrogen Fixation and organic matter in the Tropics. *Trans 12 th. Internat. Congr. Soil Sci.* (New - Delhi 8 - 16 fev 1982) p: 99 - 114.

SEDOGO (M.P.), 1981. - Contribution à la valorisation des résidus cultureux en sol ferrugineux et sous climat tropical semi - aride. Matière organique du sol et nutrition azotée des cultures. Thèse de docteur - ingénieur, Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, 195 p.

SENEVRATNE (R.) and WILD (A.), 1985. - Effect of mild drying on the mineralization of soil nitrogen. *Plant Soil*, 84: 175 - 179.

SOKPON (N.) et LEJOLY (J.), 1991. - Phenologie et production de litière dans la forêt dense semi-décidue de POBE (Sud-Est BENIN). *Revue Forestière Française*. Hors série N°2; 171-176.

SOWDEN (F.J.), 1977. - Distribution of nitrogen in representative canadian soils. *Can. J. Soil Sci.* 57: 445 - 456.

SPIK (G.), STRECKER (G.) et MONTREUIL (J.), 1969. - Etudes sur les glycoprotéines. Les réactions de transosylation, cause d'erreurs dans la détermination par chromatographie des rapports molaires des oses neutres constituant les osides libres et conjugués. *Bull. Soc. Chim. Biol.*, 51: 1287-1295

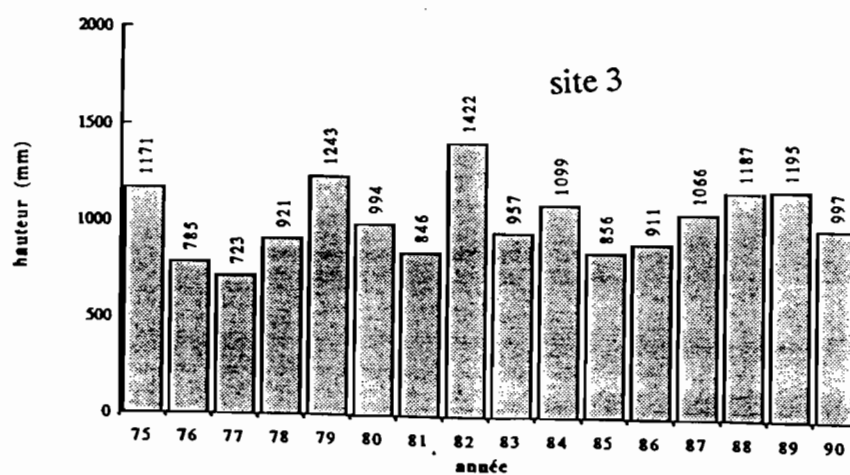
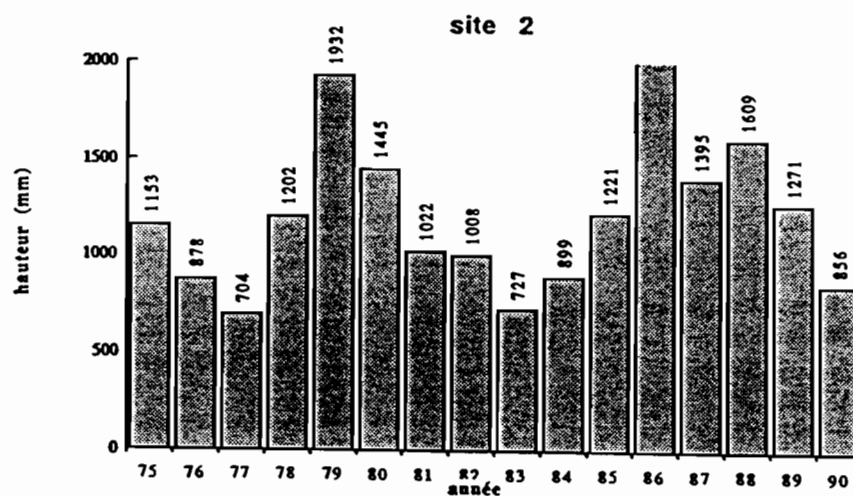
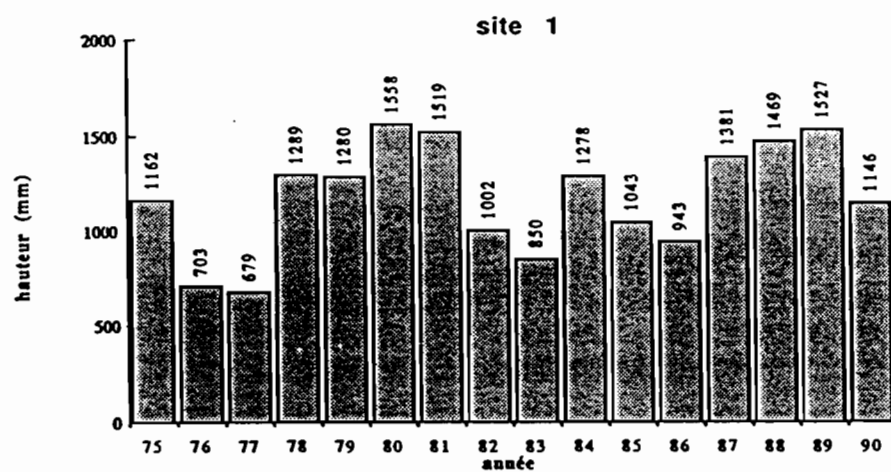
- STANFORD (G.) et de MENT (J.D.)**, 1957. - A method for measuring short - term nutrient absorption by plants: I. Phosphorus. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, pp 612 - 617
- STANFORD (G.) and SMITH (S.J.)**, 1972. - Nitrogen mineralization potentials of soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 36: 465 - 472.
- STANFORD (G.) FRERE (M.H.) and SCHWANINGER (D.H.)**, 1973. - Temperature coefficient of soil nitrogen mineralization. *Soil Sci.*, 115: 321 - 323.
- STANFORD (G.) and EPSTEIN (E.)**, 1974. - Nitrogen mineralization - water relation in soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 38 : 103 - 106.
- STANFORD (G.), CARTER (J.N.), WESTERMANN and MEISINGER (J.J.)**, 1977. - Residual nitrate and mineralizable soil nitrogen in relation to nitrogen uptake by irrigated sugarbeets. *Agronomy Journal*, 69: 303 - 308.
- STAT - ITCF**, 1989. - Manuel d'utilisation. ITCF.
- STEVENSON (F.J.)**, 1982. - Organic forms of soil nitrogen. In: Nitrogen in agricultural soils, edited by Stevenson, *Agronomy monograph* n°22: 67 - 114
- STEWART (B.A.), PORTER (I.K.) and JOHNSON (D.D.)**, 1963. - Immobilization and mineralization of nitrogen in several organic fractions of soil. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 27 (3): 302 - 304.
- TABATABAI (M.A.) and Al - KHAFAJI (A.A.)**, 1989. - Comparison of nitrogen and sulfur mineralization in soils. *Soil Sci. Soc. Am J.* 44: 1000 - 1006.
- TIESSEN (H.) and STEWART (J.W.B.)**, 1983. - Particle - size fractions and their use in studies of soil organic matter. II. Cultivation effects on organic matter composition in size fractions. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 47: 509 - 514.

- TRACY (M.S.)**, 1952. - The determination of glucosamine by alkaline decomposition. *Biochem. J.*, 52: 265 - 267.
- TURCHENECK (L.W.) and OADES (J.M.)**, 1979. - Fractionation of organo mineral complexes by sedimentation and density techniques. *Geoderma*, 21: 311-343.
- VERSTRASTE (W.) and VOETS (J.P.)**, 1976. - Nitrogen mineralization tests and potentials in relation to soil management. *Pedologie*, 26: 15 - 26.
- VLASSAK (K.); VERSTRAETEN (L.M.J.) and LIVENS (J.)**, 1969. - Distribution of forms of nitrogen and carbon of some soil profiles. *Soil Sci.*, 108 (2): 127 - 131.
- VOLKOFF (B.) et WILLAINE (P.)**, 1976. - *Carte pédologique de reconnaissance de la République Populaire du Bénin. Feuille de Porto - Novo*. Notice explicative n° 66 (1), ORSTOM (Paris), 39p., 1 carte h.t.
- VOLKOFF (B.)**, 1976. - *Carte pédologique de reconnaissance de la République Populaire du Bénin au 1 / 200 000. Feuille d'Abomey*. Note explicative n° 66 (2), ORSTOM (Paris), 40p, 1 carte h.t.
- VONG (P.C.), BOUCHAMA (J.) et JACQUIN (F.)**, 1989. - Contribution à l'étude du potentiel de minéralisation de l'azote en sols cultivés lorrains. *Science du sol*, 27 (3): 215-226.
- WANEUKEM (V)**, 1991. - *Test de diagnostic de la fertilité azotée d'un sol tropical. Essai de validation in situ d'un indicateur chimique du sol*. DEA, INPT / ENSA. Rapp multigr, IRAT / CIRAD, Montpellier, 39 p + annexes
- WARREN (G.P.) et WHITEHEAD (D.C.)**, 1988. - Available soil nitrogen in relation to fractions of soil nitrogen and other soil properties. *Plant and Soil*, 112 :155-165

WERTZ (R.), 1979. - Dossier pour une synthèse des résultats de la recherche agronomique au Bénin en maïsiculture. Rapp IRAT/CIRAD (Cotonou), 241 p., multigr.

YONEBAYASHI (K.) and HATTORI (T.), 1980. - Improvment in the method for fractional determination of soil organic nitogen. *Soil. Sci. Plant. Nutr.*, 26: 469-481

Annexe I.1

Moyennes pluviométriques annuelles (1975-1990)

Annexe II.1

Caractéristiques physico-chimiques des sols sous forêt

	SITE 1	SITE 2	SITE 3
CEC (cmol. kg ⁻¹)			
0-15 cm	7,2	6,8	3,7
35-50 cm	3,9	3,3	1,8
100-120 cm	4,1	5,2	2,3
Ca (cmol. kg ⁻¹)			
0-15 cm	5,2	5,0	2,3
35-50 cm	2,3	2,5	0,9
100-120 cm	1,9	3,9	0,9
Mg (cmol. kg ⁻¹)			
0-15 cm	2,3	1,4	1,2
35-50 cm	1,4	0,7	0,7
100-120 cm	1,2	1,6	0,9
K (cmol. kg ⁻¹)			
0-15 cm	0,10	0,20	0,06
35-50 cm	0,02	0,12	0,02
100-120 cm	0,01	0,06	0,01
pH (eau)			
0-15 cm	6,3	7,5	5,9
35-50 cm	6,5	7,4	5,6
100-120 cm	5,3	6,3	5,3
P assimilable (ppm)			
0-15 cm	9,0	37,6	7,5
35-50 cm	2,3	26,3	5,1
100-120 cm	2,3	28,9	3,5

Annexe IV.1a, b, c

Caractéristiques microstructurales des horizons A11, A12 et AB

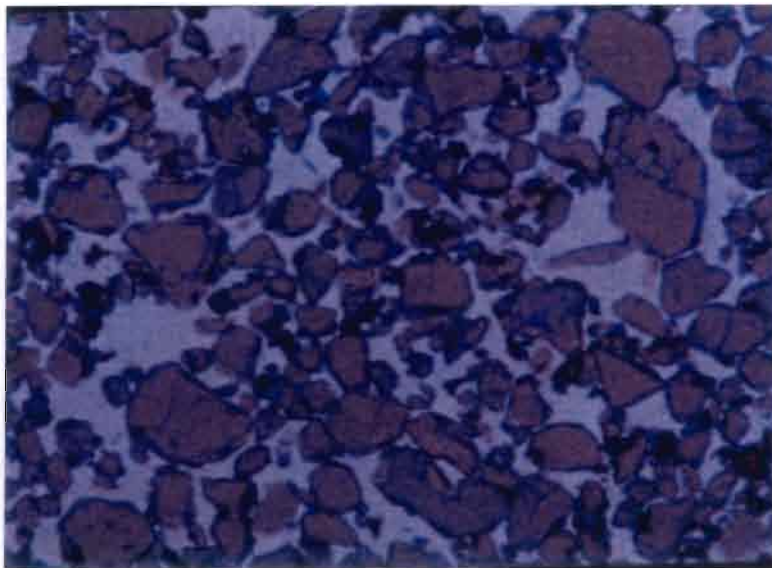


Photo 1

500 μ

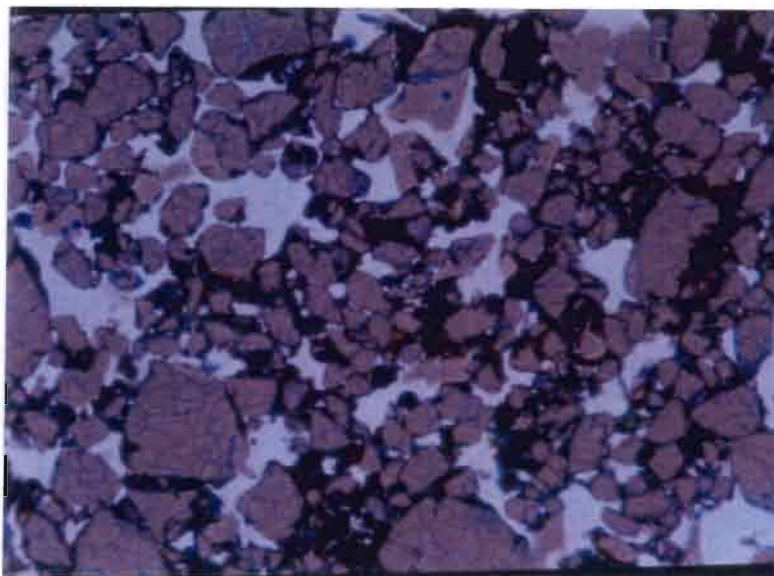


Photo 2

500 μ

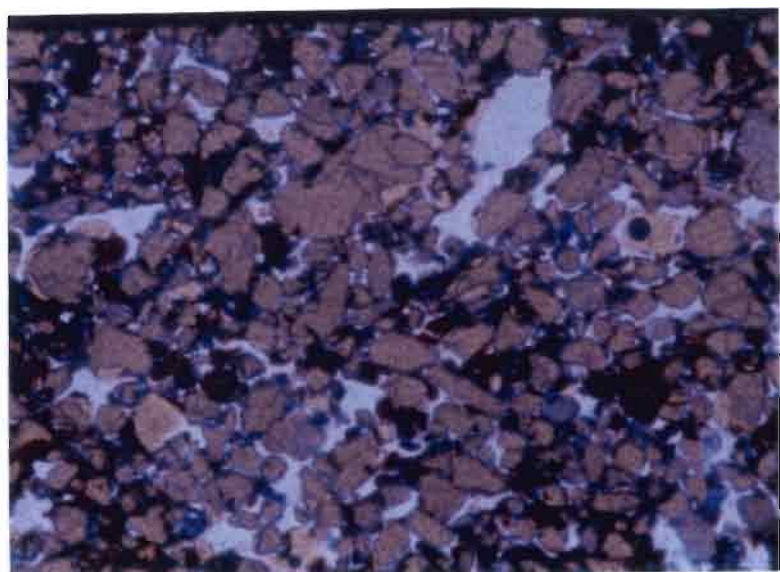


Photo 3

300 μ

Annexe IV.1a (photo n° 1) - *Caractéristiques microstructurales de l'horizon A11*
(Site 2, Akpadanou) - Situation culturelle : PSC

Empilement régulier de grains de quartz rapprochés, souvent jointifs, fortement émoussés et craquelés. Granulométrie étalée, le mode se situant entre 100 à 300 μm pour le site 1, entre 150 et 500 μm pour le site 2. Les grains sont revêtus d'une pellicule brun rougeâtre Plasma peu abondant, brun foncé, régulièrement distribué. Il figure sous forme de petits amas assez arrondi dans les espaces intergranulaires (assemblage énaulique) ou, plus rarement, constitue des ponts intergranulaires (assemblage géfurique). La macroporosité (vide $> 30 \mu\text{m}$) mesurée en photo est de 30 %. Elle est surtout constituée de vides d'entassement de diamètre $< 200 \mu\text{m}$, mais aussi de quelques cavités communicantes de taille $< 500 \mu\text{m}$.

Annexe IV.1b (photo n° 2) - *Caractéristiques microstructurales de l'horizon A12*
(Site 2, Akpadanou) - Situation culturelle : F

Squelette quartzeux identique à celui de A11.
Plasma assez abondant, brun foncé. Il constitue souvent des ponts intergranulaires (assemblage géfurique), mais peut également figurer sous forme de microagrégats arrondis non liés au squelette (assemblage énaulique). La macroporosité est de l'ordre de 20 à 25 %, consistant surtout en cavités allongées plus ou moins communicant. L'aspect général est celui d'une microstructure spongieuse.

Annexe IV.1c (photo n° 3) - *Caractéristiques microstructurales de l'horizon AB*
Site 1, Pobè) - Situation culturelle : PSC

Squelette quartzeux identique aux horizons supérieurs.
Plasma plus abondant, brun rouge apparaissant légèrement strié en lumière polarisée. L'assemblage géfurique (ponts intergranulaires) est dominant, mais le plasma se présente aussi sous forme de microagrégats arrondis pressés dans les espaces intergranulaires (assemblage énaulique) et parfois d'une masse dense enchassant des grains de quartz rapprochés (assemblage porphyrique). La macroporosité est de l'ordre de 10 à 15 %. C'est une porosité fine d'entassement à laquelle s'associent quelques cavités allongées, irrégulièrement réparties.

Les descriptions ont été faites selon BULLOCH *et al.*, 1985.

Annexe IV.2

Caractéristiques analytiques des sols étudiés

SITES	SITE 1				SITE 2					SITE 3			
Passé cultural	F	PSC	PSN	CV	F	PF	PSC	PSN	CV	F	PF	PSC	CV
SBE Somme des bases échangeables cmol. kg ⁻¹													
0-15 cm	7,66	2,84	1,57	3,88	6,84	4,54	2,30	1,87	3,46	3,64	3,18	1,32	1,66
15-35	3,85	2,16	1,66	2,76	4,77	2,43	1,87	1,47	2,51	2,77	1,87	1,27	1,50
35-50	3,72	2,09	1,96	2,69	3,28	2,14	1,68	1,30	1,90	1,68	1,50	1,59	1,51
Ca cmol. kg ⁻¹													
0-15 cm	5,19	2,16	1,02	2,63	5,02	3,69	1,61	1,29	2,31	2,31	2,12	0,78	0,91
15-35	2,58	1,78	1,21	1,80	3,62	1,93	1,35	1,10	1,62	1,70	1,15	0,76	0,80
35-50	2,29	1,63	1,57	1,65	2,45	1,57	1,06	0,85	1,22	0,93	0,84	0,83	0,78
Mg cmol. kg ⁻¹													
0-15 cm	2,33	0,50	0,26	1,11	1,40	0,74	0,59	0,47	1,08	1,21	0,97	0,36	0,64
15-35	1,20	0,27	0,17	0,85	0,98	0,41	0,43	0,27	0,81	0,94	0,63	0,39	0,61
35-50	1,37	0,35	0,26	0,97	0,69	0,50	0,55	0,35	0,62	0,65	0,58	0,65	0,64
K cmol. kg ⁻¹													
0-15 cm	0,10	0,05	0,04	0,06	0,20	0,09	0,03	0,03	0,04	0,06	0,04	0,01	0,01
15-35	0,04	0,03	0,04	0,04	0,15	0,07	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04	0,01	0,01
35-50	0,02	0,03	0,02	0,01	0,12	0,05	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02	0,01
P assimilable (ppm)													
0-15 cm	9,0	5,4	5,3	6,0	37,6	19,6	11,3	6,3	16,9	7,5	5,6	4,4	7,1
15-35	5,3	3,0	2,6	5,9	27,9	12,6	4,9	3,3	9,6	6,1	3,7	3,0	8,7
35-50	2,3	2,5	2,5	3,4	26,3	6	5,1	3,2	7,9	5,1	3,3	2,3	4,8

Passé cultural : F = Forêt ; PSC = Palmeraie sol couvert au jeune âge ; PSN = Palmeraie sol nu au jeune âge ; CV = Cultures vivrières ; PF = Plantations Forestières

Annexe V.1

*Variabilité spatiale des teneurs en carbone (%)
sous palmeriaie sol couvert au jeune âge (site 3)*

	ANDAINS	INTERLIGNE	ROND
0-15 cm	0,82 ± 0,14 a	0,46 ± 0,08 c	0,55 ± 0,09 b
15-35 cm	0,54 ± 0,09 b	0,35 ± 0,06 d,e	0,46 ± 0,02 c
35-50 cm	0,40 ± 0,05 c,d	0,37 ± 0,05 d,e	0,34 ± 0,02 d,e
50-70 cm	0,33 ± 0,03 d,e	0,29 ± 0,05 e,f	0,35 ± 0,03 d,e
100-120 cm	0,23 ± 0,03 f,g	0,25 ± 0,02 f,g	0,22 ± 0,03 g

Annexe V.2

*Variabilité spatiale des teneurs en azote (mgNg⁻¹)
sous palmeraie sol couvert au jeune âge (site 3)*

	ANDAINS	INTERLIGNE	ROND
0-15 cm	0,52 ± 0,04 a	0,26 ± 0,03 d,e	0,36 ± 0,08 b
15-35 cm	0,34 ± 0,03 c	0,24 ± 0,03 c	0,32 ± 0,06 c,d
35-50 cm	0,28 ± 0,05 c,d,e	0,27 ± 0,03 d,e	0,29 ± 0,03 c,d,e
50-70 cm	0,29 ± 0,02 c,d,e	0,27 ± 0,02 d,e	0,31 ± 0,02 c,d,e
100-120 cm	0,25 ± 0,04 d,e	0,25 ± 0,02 d,e	0,25 ± 0,02 d,e

NB - Les teneurs suivies de lettres différentes diffèrent significativement au seuil de probabilité de 5 %

Annexe V.3

*Variabilité spatiale des teneurs en carbone (%) et en azote (mgN g⁻¹)
dans une parcelle de cultures vivrières (site 3)*

	CARBONE/BILLON	CARBONE/ INTERBILLONS	AZOTE/BILLON	AZOTE/ INTERBILLON
+ 8 - 0 cm	0,57 ± 0,04		0,40 ± 0,09	
0 - 15 cm	0,43 ± 0,06	0,46 ± 0,05	0,33 ± 0,06	0,32 ± 0,03
15 - 35 cm	0,30 ± 0,04	0,29 ± 0,02	0,24 ± 0,02	0,27 ± 0,01
35 - 50 cm	0,30 ± 0,03	0,28 ± 0,03	0,21 ± 0,02	0,27 ± 0,01
50 - 70 cm	0,29 ± 0,05	0,27 ± 0,03	0,30 ± 0,05	0,30 ± 0,05
100 - 120 cm	0,20 ± 0,03	0,18 ± 0,02	0,27 ± 0,02	0,25 ± 0,02

Annexe VI.1

*Teneur et stocks de carbone et d'azote dans les fractions granulométriques
de l'horizon 50-70 cm (PSC-site 1)*

			FRACTIONNEMENT				
	Poids % (AM)	Poids % (US)	CARBONE		AZOTE		C/N
			mg/g fraction	mg/g sol	mg/g fraction	mg/g sol	
2000/200 μm	20,3	26,6	$3,4 \pm 0,40$	$0,89 \pm 0,13$	$0,40 \pm 0,07$	$0,11 \pm 0,03$	8
200/50 μm	37,4	61,8	$3,2 \pm 0,20$	$1,97 \pm 0,13$	$0,10 \pm 0,00$	$0,06 \pm 0,00$	32
50/2 μm	3,2	2,9	$12,8 \pm 1,50$	$0,37 \pm 0,03$	$1,82 \pm 0,40$	$0,05 \pm 0,01$	7
< 2 μm	39,0	8,7	$8,6 \pm 0,30$	$0,74 \pm 0,11$	$1,70 \pm 0,50$	$0,15 \pm 0,05$	5
Matière organique légère	0,06						
Sol fractionné	99,96			3,97		0,37	
Sol non fractionné		100		3,70		0,38	

AM = analyse mécanique après traitement H_2O_2 et dispersion par l'hexamétophosphate

US = fractionnement granulométrique par tamisage humide après agitation avec des billes de verre et traitement modéré par les ultrasons : 5 minutes sur la fraction inférieure à 200 μm et 10 minutes sur la fraction inférieure à 50 μm .

Annexe VII.1 a

N- FLUSH (mgNkg⁻¹ de sol)

Passé cultural	SITE 1	SITE 3
F	60,8 a	36,1 d
P F	-	23,8 e
P S C	22,4 b	7,6 g
P S N	16,2 c	-
C V	20,9 b	11,0 f
Coefficient de variation	9,2 %	2,7 %

Annexe VII.1 b

N- minéral initial (mgNkg⁻¹ sol)

Passé cultural	SITE 1	SITE 2	SITE 3
F	130,4	15,1	18,9
PF	-	-	12,3
PSC	11,2	5,5	7,3
PSN	12,2	4,5	-
CV	13,1	5,7	30,5

F : Forêt
 PF : Plantation forestière
 PSC : Palmeraie sol couvert au jeune âge
 PSN : Palmeraie sol nu au jeune âge
 CV : Cultures vivrières

NB : Les teneurs suivies de lettres différentes diffèrent significativement au seuil de probabilité de 5 %

Annexe VIII.1*Solutions minérales pour l'essai en vase de végétation***Solution n°1 :**

Na H ₂ PO ₄ , 2H ₂ O	27,2	g/l
---	------	-----

Solution n° 2 :

KHCO ₃	26,57	g/l
CaCl ₂ , 6H ₂ O	17,08	g/l
Mg SO ₄ , 7H ₂ O	7,61	g/l

Solution n° 3 :

SO ₄ Mn, H ₂ O	0,1125	g/l
SO ₄ Zn, 7H ₂ O	0,056	g/l
SO ₄ Cu, 5H ₂ O	0,078	g/l
Acide borique	0,050	g/l
Molybdate de sodium	0,001	g/l

Les solutions n° 1 et n° 2, apportées à raison de 20 cc par pot correspondent à des apports totaux pour la culture de :

P	0,44	g
K	0,83	g
Ca	0,25	g
Mg	0,06	g

Rythme d'apport : 4 apports toutes les semaines dont le premier au semis

Volume apporté par pot : 20 cc des solutions 1, 2
10 cc de la solution 3

(méthode modifiée à partir de Chaminade 1965)

Annexe VIII.2

Analyse de la variance de la biomasse végétale récoltée (gramme de matière sèche)

Effet du passé cultural		Effet de la solution minérale (sans azote)		Moyenne par traitement			
Sols sous	Moyenne générale		Moyennes				
Forêt	3,51 a	avec apport (ASM)	2,30 a	F-ASM	3,73 a	CV-ASM	1,52 d
PSC	1,71 b	sans apport (SSM)	1,65 b	F-SSM	3,29 b	CV-SSM	1,26 e
PSN	1,39 c			PSC-ASM	2,26 c	PSC-SSM	1,17 e
CV	1,29 c			PSN-ASM	1,69 d	PSN-SSM	0,88 f

TABLEAU D'ANALYSE DE VARIANCE

Source de variation	SCE	DDL	Carrés moyens	Test de F	Coefficient de variation
Variation totale	21 554,45	31	695,30		
Variation passé cultural	19 781,91	3	6 593,97	721,4 ***	
Variation solution minérale	1 215,36	1	1 215,36	133,0 ***	
Variation interaction	337,42	3	112,64	12,3 ***	
Variation bloc et résiduelle	219,30	24	9,14		7,4 %

F : Forêt PSC : Palmeraie sol couvert PSN : Palmeraie sol nu CV : Cultures vivrières
 ASM : Avec apport de solution minérale (sans azote) SSM : Sans apport de solution minérale (sans azote)

Annexe VIII.3

Teneurs en azote du ray-grass récolté (en % du poids de matière sèche)

Sols sous	Parties de la biomasse récoltée	Sans solution minérale	Avec solution minérale (sans azote)
FORET	a	2,75 ± 0,20	3,06 ± 0,28
	b	2,27 ± 0,12	2,09 ± 0,20
	c	1,03	1,01
	d	1,04	1,05
PSC	a	2,34 ± 0,12	2,04 ± 0,09
	b	2,36 ± 0,13	1,89 ± 0,14
	c	1,22	1,15
	d	0,95	0,82
PSN	a	2,15 ± 0,18	1,98 ± 0,05
	b	2,29 ± 0,03	1,94 ± 0,20
	c	1,47	0,86
	d	0,93	0,76
CV	a	2,02 ± 0,04	1,99 ± 0,18
	b	2,06 ± 0,11	1,81 ± 0,05
	c	1,34	0,98
	d	1,09	1,03

a : 1ère coupe **b** : 2ème coupe **c** : biomasse résiduelle (collet) **d** : racines

Effet du passé cultural		Effet de la solution minérale (sans azote)		Moyenne par traitement			
Sols sous	Moyenne générale		Moyennes				
Forêt	81,33 a	avec apport (ASM)	44,55 a	F-ASM	87,96 a	CV-ASM	25,05 de
PSC	27,00 b	sans apport (SSM)	32,22 b	F-SSM	74,69 b	CV-SSM	21,90 d
PSN	23,47 c			PSC-ASM	37,72 c	PSC-SSM	16,28 f
CV	21,75 c			PSN-ASM	27,47 d	PSN-SSM	16,03 f

Tableau d'analyse de variance

Source de variation	SCE	DDL	Carrés moyens	Test de F	Coefficient de variation
Variation totale	30,46	31	0,98		
Variation passé cultural	25,91	3	8,64	576***	
Variation solution minérale	3,95	1	3,35	283***	
Variation interaction	0,84	3	0,28	18,7***	
Variation bloc et résiduelle	0,36	24	0,015		6,5 %

F : Forêt PSC : Palmeraie sol couvert PSN : Palmeraie sol nu CV : Cultures vivrières
 ASM : Avec apport de solution minérale (sans azote) SSM : Sans apport de solution minérale (sans azote)

Annexe VIII.5 a : Teneurs et quantités (mg) de calcium prélevé par le ray-grass (1ère coupe)

TENEURS (% poids de matière sèche)			QUANTITES PRELEVEES (mg/pot)	
Passé cultural	Sans solution minérale	Avec solution minérale	Sans solution minérale	Avec solution minérale
F	1,02 b	0,71 c	19,69 a	14,56 b
PSC	1,21 a	0,58 cd	8,59 c	7,05 cd
PSN	1,28 a	0,51 d	6,06 d	4,51 e
CV	1,33 a	0,63 cd	8,36 c	4,59 e

Annexe VIII.5 b : Teneurs et quantités (mg) de magnésium prélevé par le ray-grass (1ère coupe)

TENEURS (% poids de matière sèche)			QUANTITES PRELEVEES (mg/pot)	
Passé cultural	Sans solution minérale	Avec solution minérale	Sans solution minérale	Avec solution minérale
F	0,44 d	0,32 f	8,46 a	6,58 b
PSC	0,69 b	0,29 f	4,93 c	3,50 d
PSN	0,63 c	0,25 g	3,23 d	2,26 e
CV	0,82 a	0,38 e	5,18 c	2,83 de

Annexe VIII.5 c : Teneurs et quantités (mg) de potassium prélevé par le ray-grass (1ère coupe)

TENEURS (% du poids de matière sèche)			QUANTITES PRELEVEES (mg/pot)	
Passé cultural	Sans solution minérale	Avec solution minérale	Sans solution minérale	Avec solution minérale
F	4,13 b	6,66 a	79,99 b	135,98 a
PSC	1,66 c	6,49 a	11,81 e	78,54 b
PSN	1,77 c	6,68 a	8,43 e	59,17 c
CV	1,23 d	6,33 a	7,76 e	46,75 d

Annexe IX.1

Technique d'hydrolyse acide

Après des essais de conditions opératoires, nous avons retenu de moduler les prises d'échantillon en fonction de l'azote total des sols. Pour les échantillons riches en matière organique, (en général les horizons de surface), une prise d'échantillon de 15 à 20 grammes était suffisante pour obtenir une bonne précision des dosages des différentes fractions de l'azote. Par contre, pour des échantillons pauvres en matière organique, les prises d'essai étaient un peu plus élevées, de l'ordre de 25 à 35 grammes.

Le mode opératoire inspiré de la méthode de (STEWART *et al.*, 1963) consiste à placer l'échantillon de terre dans un erlenmeyer de 500 mL auquel on ajoute 90 mL de HCl 6N. L'erlenmeyer connecté sur un réfrigérant est amené à ébullition pendant 16 heures sur une plaque chauffante de 250 watts. Après hydrolyse, le mélange est refroidi, centrifugé et le surnageant est recueilli dans une fiole jaugée de 200 mL. Le culot est lavé avec de l'eau distillée au moins trois fois en tout cas jusqu'à obtention d'un résidu incolore et l'eau de lavage est ajoutée au surnageant. En fin d'opération, la fiole est ajustée au trait de jauge et on obtient ainsi:

- l'hydrolysate dans la fiole jaugée
- le "résidu" dans le culot de centrifugation.

L'alcalinisation par la soude 10N d'une aliquote de l'hydrolysate (100 mL), son chauffage avec entraînement de NH_3 à la vapeur puis le dosage de l'ammonium permettent d'obtenir une première fraction: l'azote hydrolysable distillable, ci - après désigné NhD. L'azote hydrolysable total (NhT) est obtenu par entraînement à la vapeur après minéralisation KJELDAHL d'une fraction aliquote de l'hydrolysate (50 mL). L'azote non hydrolysable (NnH) est dosé après minéralisation KJELDAHL de l'azote restant dans le culot précédemment séché à l'air. L'azote hydrolysable non distillable (NHnD) est obtenue par différence entre les fraction hydrolysable totale (NhT) et hydrolysable distillable (NhD).

Annexe IX.2

Bilan des dosages des fractions azotées après hydrolyse acide

N° échantillons	N	Nf	(Nf/N) x 100
1	1388	1374	99
2	605	617	98
3	487	475	98
4	513	489	95
5	341	323	95
6	426	430	101
7	308	308	100
8	286	263	92
9	380	364	96
10	308	289	94

N = azote total mesuré par Kjeldahl ; Nf = somme de l'azote contenu dans les fractions

Annexe IX.3 a

Teneurs des différentes fractions azotées (mgNkg^{-1} sol) obtenues par hydrolyse acide (site 1)

SITE 1		FRACTIONS AZOTEES		
Profondeur	Systèmes de culture	N H D	N H n D	N n H
0 - 15 cm	F	350,60	773,90	249,80
	P S C	160,50	312,80	150,70
	P S N	115,40	137,40	77,70
	CV	159,30	316,10	152,60
15 - 35 cm	F	159,60	350,00	107,80
	P S C	97,50	172,10	71,70
	P S N	88,30	162,60	57,80
	CV	157,10	208,80	79,80
35 - 50 cm	F	132,10	261,00	81,50
	P S C	76,60	129,30	49,20
	P S N	77,10	137,90	48,90
	CV	119,50	182,30	68,60
50 - 70 cm	F	144,60	243,20	101,50
	P S C	116,20	175,70	84,60
	P S N	111,10	177,40	75,50
	CV	-	-	-
100 - 120 cm	F	91,30	161,80	70,30
	P S C	82,60	135,10	64,70
	P S N	87,80	129,80	71,70
	CV	-	-	-

F = Forêt PSC = Palmeraie sol couvert au jeune âge
 NHD = Azote hydrolisable distillable

PSN = Palmeraie sol nu au jeune âge
 NHnD = Azote hydrolisable non distillable

CV = Cultures vivrières
 NnH = Azote non hydrolisable

Annexe IX.3 b

Teneurs des différentes fractions azotées (mgNkg⁻¹ sol) obtenues par hydrolyse acide
(site 2)

		FRACTIONS AZOTEES		
Profondeur	Systèmes de culture	N H D	N H n D	N n H
0 - 15 cm	F	282,80	745,70	242,20
	PF	164,50	354,90	156,80
	P S C	111,50	213,30	75,40
	P S N	80,80	163,50	49,80
	CV	126,00	266,00	121,80
15 - 35 cm	F	172,80	410,90	134,40
	PF	84,70	175,70	62,70
	P S C	80,20	135,70	44,60
	P S N	65,70	110,40	33,60
	CV	98,00	176,40	77,00
35 - 50 cm	F	103,60	228,20	77,40
	PF	70,40	137,50	50,80
	P S C	74,50	116,80	34,40
	P S N	72,80	112,00	30,80
	CV	78,40	140,00	53,20
50 - 70 cm	F	111,10	252,20	81,60
	PF	94,80	168,40	81,20
	P S C	78,90	125,00	44,60
	P S N	76,90	119,10	41,00
	CV	78,40	134,40	46,20
100 - 120 cm	F	114,10	246,40	94,90
	PF	77,80	130,50	66,10
	P S C	69,10	112,00	38,80
	P S N	65,00	104,70	47,70
	CV	92,40	159,60	64,40

F = Forêt

PF = Plantation forestière

PSC = Palmeraie sol couvert

PSN = Palmeraie sol nu

CV = Cultures vivrières

NHD = Azote hydrolisable distillable

NHnD = Azote hydrolisable non distillable

NnH = Azote non hydrolisable

Annexe IX.3 c

*Teneurs des différentes fractions azotées (mgNkg⁻¹ sol) obtenues par hydrolyse acide
(site 3)*

		FRACTIONS AZOTEES		
Profondeur	Système de culture	N H D	N H n D	N n H
0 - 15 cm	F	214,10	487,60	161,10
	P F	154,30	359,80	121,30
	PSC	76,70	136,80	33,90
	CV	89,60	186,70	53,20
15 - 35 cm	F	130,20	282,30	106,80
	P F	107,10	214,60	66,40
	PSC	75,00	135,90	29,70
	CV	82,50	148,30	58,30
35 - 50 cm	F	87,40	178,00	57,30
	P F	85,70	156,60	52,10
	PSC	78,40	142,50	37,30
	CV	79,60	153,70	41,50
50 - 70 cm	F	95,60	191,50	61,40
	P F	113,50	197,30	68,20
	PSC	81,20	144,00	47,80
	CV	86,50	147,50	59,30
100 - 120 cm	F	78,40	146,20	58,80
	P F	87,40	146,30	61,10
	PSC	64,10	123,10	38,90
	CV	68,60	129,30	57,90

F = Forêt

PF = Plantation forestière

PSC = Palmeraie sol couvert

CV = Cultures vivrières

NHD = Azote hydrolysable distillable

NHnD = Azote hydrolysable non distillable

NnH = Azote non hydrolysable

Annexe IX.4
Indices d'appauvrissement relatif (IAR) de chaque fraction azotée
par rapport au sol forestier

S C	Site	N H D					NHnD					NnH				
		0-15	15-35	35-50	50-70	100-120	0-15	15-35	35-50	50-70	100-120	0-15	15-35	35-50	50-70	100-120
P F	2	41,8	51,0	32,1	14,7	31,8	52,4	57,2	39,8	33,2	47,0	35,3	53,4	34,4	0,5	30,4
P F	3	27,9	17,7	2,0	-	-	26,2	23,9	12,0	-	-	24,7	37,8	9,1	-	-
P S C	1	54,2	28,9	42,0	19,6	9,5	59,6	50,8	50,5	27,8	16,5	39,7	33,5	39,6	16,7	7,9
P S C	2	60,6	53,6	28,1	28,9	39,4	71,4	66,9	48,8	50,4	54,6	68,9	66,8	55,6	45,3	59,1
P S C	3	64,2	42,4	10,3	15,1	18,2	71,9	51,9	19,9	24,8	15,8	79,0	72,2	34,9	22,2	33,8
P S N	1	67,1	44,7	41,6	23,2	3,8	82,2	53,5	47,2	27,06	19,8	68,9	46,4	40,0	31,9	7,9
P S N	2	71,4	62,0	29,7	30,8	43,0	78,1	73,1	50,9	52,8	57,5	79,4	75,0	60,2	49,8	49,7
C V	1	54,6	1,6	9,5	-	-	59,2	40,3	30,2	-	-	38,9	25,9	15,8	-	-
C V	2	55,5	43,3	24,3	29,4	19,0	64,3	57,1	38,7	46,7	35,2	49,7	42,71	31,3	43,4	32,1
C V	3	58,2	36,6	8,5	9,5	12,5	61,7	47,5	13,7	23,0	11,6	67,0	45,4	27,6	34,2	1,5

P F : Plantation forestière P S C : Palmeraie sol couvert P S N : Palmeraie sol nu C V : Cultures vivrières

S C : Système de cultures N H D : Azote hydrolysable distillable N H n D : Azote hydrolysable non distillable

N n H : Azote non hydrolysable $IAR = \frac{Q_{forêt} - Q_{sol cultivé}}{Q_{forêt}} \times 100$ dans le même horizon

Annexe IX.5 a
*Proportion (%) des fractions azotées obtenues par hydrolyse acide
 par rapport à l'azote total (site 1)*

NHD/N x 100				
Profondeurs	F	P S C	P S N	C V
0-15	25,5	25,7	26,8	25,4
15-35	25,9	28,6	28,6	35,3
35-50	27,8	30,0	29,2	32,3
50-70	29,6	30,9	30,5	
100-120	28,2	29,3	30,3	
NHnD/N x 100				
Profondeurs	F	P S C	P S N	C V
0-15	56,3	50,1	55,2	50,3
15-35	56,7	50,4	52,7	46,9
35-50	55,0	50,7	52,3	49,2
50-70	49,7	46,7	48,7	
100-120	50,0	47,8	44,9	
NnH/N x 100				
Profondeurs	F	P S C	P S N	C V
0-15	18,2	24,2	18,1	24,3
15-35	17,5	21,0	18,7	17,9
35-50	17,2	19,3	18,5	18,5
50-70	20,7	22,5	20,7	
100-120	21,7	22,9	24,8	

F = Forêt ; PSC = Palmeraie sol couvert ; PSN = Palmeraie Sol Nu ; CV = Cultures vivrières

Annexe IX.5 b
*Proportion (%) des fractions azotées obtenues par hydrolyse acide
 par rapport à l'azote total (site 2)*

NHD/N x 100					
Profondeurs	F	P F	P S C	P S N	C V
0-15	22,3	24,3	27,9	27,5	24,5
15-35	24,1	26,2	30,8	31,3	27,9
35-50	25,3	27,2	33,0	33,8	28,9
50-70	24,9	27,5	31,8	32,5	30,3
100-120	25,1	28,4	31,4	29,9	29,2
NHnD/N x 100					
Profondeurs	F	P F	P S C	P S N	C V
0-15	58,7	52,5	53,3	55,6	51,8
15-35	57,2	54,4	52,1	52,7	50,2
35-50	55,8	53,2	51,8	51,9	51,6
50-70	56,7	48,9	50,3	50,3	51,9
100-120	54,1	47,6	50,9	48,2	50,4
NHn/N x 100					
Profondeurs	F	P F	P S C	P S N	C V
0-15	19,1	23,2	18,8	16,9	23,7
15-35	18,7	19,4	17,1	16,0	21,9
35-50	18,9	19,6	15,2	14,3	19,6
50-70	18,3	23,6	17,9	17,3	17,8
100-120	20,8	24,1	17,6	21,9	20,4

F = Forêt ; PF = Plantations Forestières ; PSC = Palmeraie Sol Couvert ; PSN = Palmeraie Sol Nu ; CV = Cultures Vivrières

Annexe IX.5 c
*Proportion (%) des fractions azotées obtenues par hydrolyse acide
 par rapport à l'azote total (site 3)*

NHD/N x 100				
Profondeurs	F	P F	P S C	C V
0-15	24,8	24,3	31,0	27,2
15-35	25,7	27,6	31,2	28,5
35-50	27,1	29,1	30,4	28,9
50-70	27,4	29,9	29,7	29,5
100-120	27,7	29,7	28,4	26,8
NHnD/N x 100				
Profondeurs	F	P F	P S C	C V
0-15	56,5	56,6	55,3	56,7
15-35	54,4	55,3	56,5	51,3
35-50	55,2	53,2	55,2	55,9
50-70	51,6	52,1	52,8	50,3
100-120	50,0	47,8	44,9	
NnH/N x 100				
Profondeurs	F	P F	P S C	C V
0-15	18,7	19,1	13,7	16,2
15-35	20,6	17,1	12,3	20,2
35-50	17,8	17,7	14,5	15,1
50-70	17,6	17,9	17,5	20,2
100-120	20,8	20,7	17,2	22,6

F = Forêt ; PF = Plantations Forestières ; PSC = Palmeraie Sol Couvert ; CV = Cultures Vivrières

Annexe IX.6

*Stocks de l'azote contenu dans les fractions obtenues par hydrolyse acide
(g/N/m² pour la couche 0-35 cm)*

SITE 1	F	P F	P S C	P S N	C V
NHD	106,0		63,3	56,9	79,4
NH _n D	233,9		117,3	110,4	127,6
N _n H	74,1		53,3	37,8	55,5
SITE 2	F	P F	P S C	P S N	C V
NHD	101,4	55,5	44,4	35,5	52,8
NH _n D	254,6	117,6	80,0	65,2	102,6
N _n H	82,9	47,6	27,3	19,8	45,8
SITE 3	F	P F	P S C	P S N	C V
NHD	73,8	58,2	40,3	-	45,0
NH _n D	164,4	125,9	72,4	-	75,6
N _n H	57,9	40,8	16,9	-	29,5

F = Forêt ; PF = Plantations Forestières ; PSC = Palmeraie Sol Couvert ; PSN = Palmeraie Sol Nu ; CV = Cultures Vivrières

Annexe IX.7

Rapport NHnD/NHD

SITE 1	FORET	P F	P S C	P S N	C V
0 - 15	2,21		1,95	2,06	1,98
15 - 35	2,19		1,77	1,84	1,33
35 - 50	1,98		1,69	1,79	1,53
50 - 70	1,68		1,51	1,60	
100 - 120	1,77		1,64	1,48	
SITE 2	FORET	P F	P S C	P S N	C V
0 - 15	2,64	2,16	1,91	2,02	2,11
15 - 35	2,38	2,07	1,69	1,68	1,80
35 - 50	2,20	1,95	1,57	1,54	1,79
50 - 70	2,27	1,78	1,58	1,55	1,71
100 - 120	2,16	1,68	1,62	1,61	1,73
SITE 3	FORET	P F	P S C	P S N	C V
0 - 15	2,28	2,33	1,78		2,08
15 - 35	2,17	2,00	1,81	1,84	1,80
35 - 50	2,04	1,83	1,82	1,79	1,93
50 - 70	2,00	1,74	1,77	1,60	1,71
100 - 120	1,86	1,67	1,92	1,48	1,88

Annexe IX.8

Bilan des pertes (g/m²) des fractions azotées par rapport aux sols forestiers pour la couche (0-35 cm)

SITE	ΔNHD				ΔNHnD				ΔNnH			
	P F	P S C	P S N	C V	P F	P S C	P S N	C V	P F	P S C	P S N	C V
Site 1	-	42,7	49,1	29,6	-	116,6	123,5	106,3	-	20,8	36,3	18,6
Site 2	45,9	57,0	65,9	48,6	137,0	174,6	189,4	152,0	35,3	55,6	63,1	37,1
Site 3	15,6	33,5	-	28,8	38,5	92,0	-	88,8	17,1	41,0	-	28,4

ΔNHD = Variation des stocks d'azote hydrolysable distillable par rapport au sol forestier

ΔNnH = Variation des stocks d'azote non hydrolysable par rapport au sol forestier

ΔNHnD = Variation des stocks d'azote hydrolysable non distillable par rapport au sol forestier

PF = Plantation Forestière ; PSC = Palmeraie Sol Couvert ; PSN = Palmeraie Sol Nu ; CV = Cultures Vivrières

Annexe IX.9

Méthode rapide de distillation par la vapeur de l'azote potentiellement disponible

(d'après GIANELO et BREMNER, 1986a)

Le mode opératoire consiste à placer 4,0 g de l'échantillon de sol passé au tamis de 2 mm dans un matras à distillation de 200 ml auquel on ajoute 40 ml du tampon phosphate - borate (pH = 11,2). le matras est connecté sur l'appareil à distillation, par entraînement à la vapeur.

Le distillat est recueilli dans un erlenmeyer de 100 ml dans lequel on ajoute 5 ml de solution d'indicateurs colorés - acide borique. La distillation est arrêtée lorsque la marque de 50 ml indiquée sur l'erlenmeyer est atteinte.

L'azote ammoniacal dans le distillat est déterminé par titration avec H_2SO_4 0,005N. On détermine également l'azote ammoniacal présent initialement dans l'échantillon en distillant 4 g de sol avec 20 ml de KCl 2M et 0,2 g de MgO pendant 3 minutes.

L'azote organique du sol potentiellement disponible estimé à partir de N - NH_4 produit par distillation en présence du tampon phosphate - borate est obtenu par différence des résultats de ces deux analyses.

Annexe X.1

Méthode de fractionnement granulométrique

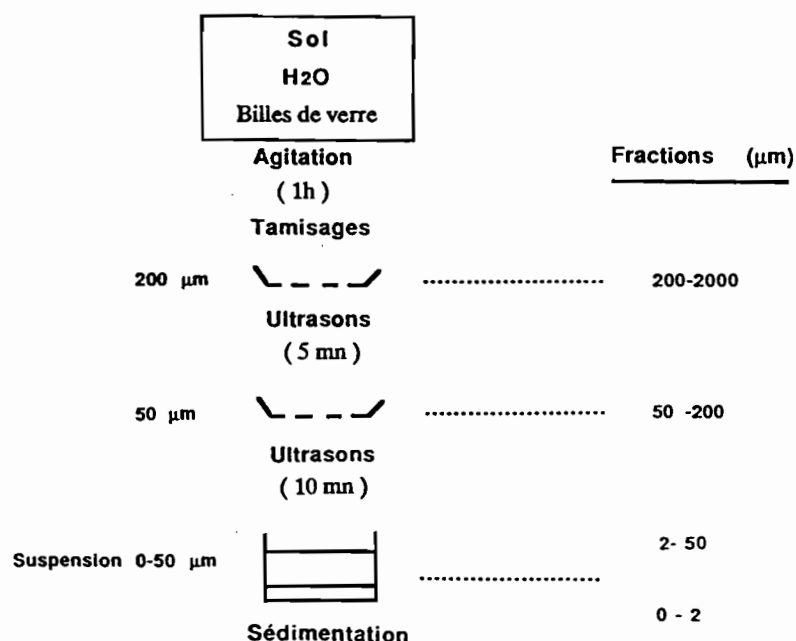
L'échantillon de sol (25g) est agité dans 150 ml d'eau avec trois billes de verre de 1 cm de diamètre pendant une heure. Le tamisage avec lavage sur un tamis d'ouverture 200 μm permet de séparer la fraction sableuse grossière (SG).

Après centrifugation, la suspension de sol inférieure à 200 μm est soumise à un traitement modéré (5 minutes) dans une cuve à ultrasons. Le tamisage avec lavage sur un tamis de 50 μm permet d'isoler la fraction sableuse fine SF (50 à 200 μm).

La suspension de sol inférieure à 50 μm est à nouveau passée pendant dix minutes dans la cuve à ultrasons. Elle est ensuite transvasée dans une allonge et les particules inférieure à 2 μm (A) sont séparés de la fraction limoneuse, L (2 à 50 μm) par sédimentation et siphonnages successifs jusqu'à épuisement.

Les différentes fractions sont séchées à l'étuve ventilée à 60 °C, elles sont ensuite pesées et broyées finement (150 μm) pour le dosage de carbone et de l'azote.

Une analyse mécanique est effectuée après destruction des matières organiques par l'eau oxygénée et dispersion à l'hexamétaphosphate de sodium. Les fractions minérales fines, argile (inférieure à 2 μm) et limons fins (2 à 20 μm), sont prélevées à la pipette Robinson, dans les allonges de sédimentation et les fractions sableuses sont obtenues par tamisage à sec.



Annexe X.2

Comparaison des bilans massiques (%) de l'analyse mécanique avec destruction de la matière organique (AM) et du fractionnement par tamisage humide après prétraitement aux ultrasons (FR) - (horizon 0-15)

SITE	SITE 1				SITE 2			
CULTURES	FORET		PSC		FORET		PSC	
Méth. fraction [†]	AM	FR	AM	FR	AM	FR	AM	FR
SG + SF (2000/50 µm)	79,9	88,6	87,0	87,5	87,8	90,2	92,5	93,0
LG + Lf (50/2 µm)	5,2	5,5	4,2	6,7	2,4	4,5	2,4	3,7
A (<2 µm)	12,1	7,2	7,4	5,9	6,8	4,4	4,1	2,4
MO	2,82		1,24		2,5		1,1	
SOMME	100,2	101,3	99,8	100,1	99,5	99,1	99,6	99,9

CHAPITRE I		
CHAPITRE II	Annexe I.1. Moyennes pluviométriques annuelles	144
CHAPITRE IV	Annexe II.1. Caractéristiques physico-chimiques des sols sous forêt	145
CHAPITRE V	Annexe IV.1a, b, c. Caractéristiques microstructurales des horizons A11, A12 et AB	146
CHAPITRE V	Annexe IV.2. Caractéristiques analytiques des sols étudiés	148
CHAPITRE VI	Annexe V.1. Variabilité spatiale des teneurs en carbone (%) sous palmeraie sol couvert au jeune âge (site 3)	149
CHAPITRE VI	Annexe V.2. Variabilité spatiale des teneurs en azote (mgNg ⁻¹) sous palmeraie sol couvert au jeune âge (site 3)	149
CHAPITRE VI	Annexe V.3. Variabilité spatiale des teneurs en carbone (%) et en azote (mgNg ⁻¹) dans une parcelle de cultures vivrières (site 3)	150
CHAPITRE VII	Annexe VI.1. Teneur et stocks de carbone et d'azote dans les fractions granulométriques de l'horizon 50-70cm	151
CHAPITRE VII	Annexe VII.1a. N-FLUSH (mgNkg ⁻¹ de sol)	152
CHAPITRE VIII	Annexe VII.1b. N-minéral initial (mgNkg ⁻¹ de sol)	152
CHAPITRE VIII	Annexe VIII.1. Solutions minérales pour l'essai en vase de végétation	153
CHAPITRE VIII	Annexe VIII.2. Analyse de la variance de la biomasse végétale récoltée (gramme de matière sèche)	154
CHAPITRE VIII	Annexe VIII.3. Teneurs en azote du ray-grass récolté (en % du poids de matière sèche)	155
CHAPITRE VIII	Annexe VIII.4. Quantités d'azote prélevées par la plante-test (mg N par traitement)	156
CHAPITRE VIII	Annexe VIII.5a. Teneurs et quantités (mg) de calcium prélevé par le ray-grass (1ère coupe)	157
CHAPITRE VIII	Annexe VIII.5b. Teneurs et quantités (mg) de magnésium prélevé par le ray-grass (1ère coupe)	157

Annexe VIII.5c. Teneurs et quantités (mg) de potassium prélevé par le ray-grass (1ère coupe)	158
CHAPITRE IX	
Annexe IX.1. Technique d'hydrolyse acide	159
Annexe IX.2. Bilan des dosages des fractions azotées après hydrolyse acide	160
Annexe IX.3a. Teneurs des différentes fractions azotées (mgNkg ⁻¹ sol) obtenues par hydrolyse acide (site 1)	161
Annexe IX.3b. Teneurs des différentes fractions azotées (mgNkg ⁻¹ sol) obtenues par hydrolyse acide (site 2)	162
Annexe IX.3c. Teneurs des différentes fractions azotées (mgNkg ⁻¹ sol) obtenues par hydrolyse acide (site 3)	163
Annexe IX.4. Indices d'appauvrissement relatif (IAR) de chaque fraction azotée par rapport au sol forestier	164
Annexe IX.5a. Proportion (%) des fractions azotées obtenues par hydrolyse acide par rapport à l'azote total (site 1)	165
Annexe IX.5b. Proportion (%) des fractions azotées obtenues par hydrolyse acide par rapport à l'azote total (site 2)	166
Annexe IX.5c. Proportion (%) des fractions azotées obtenues par hydrolyse acide par rapport à l'azote total (site 3)	167
Annexe IX.6. Stocks de l'azote contenu dans les fractions obtenues par hydrolyse acide (gN/m ² pour la couche 0-35 cm)	168
Annexe IX.7. Rapport NHnD/NHD	169
Annexe IX.8. Bilan des pertes (g/m ²) des fractions azotées par rapport aux sols forestiers pour la couche (0-35 cm)	170
Annexe IX.9. Méthode rapide de distillation par la vapeur de l'azote potentiellement disponible	171
CHAPITRE X	
Annexe X.1. Méthode de fractionnement granulométrique	172

Annexe X.2. Comparaison des bilans massiques (%) de l'analyse mécanique avec destruction de la matière organique (AM) et du fractionnement par tamisage humide après prétraitement aux ultrasons (F) - (horizon 0-15)	173
--	-----

CHAPITRE I	
Tableau I.1. Evolution de la pluviométrie dans le Sud-Bénin	12
Tableau I.2. Taille des exploitations et utilisation des sols	14
CHAPITRE II	
Tableau II.1. Teneurs en éléments fins ($l < 20 \mu m$) des sols sous forêt	23
Tableau II.2. Rapports sables fins (Sf) sur sables grossiers	24
Tableau II.3. Teneurs en C (%), en azote (‰) et rapport C/N des sols sous forêt	25
CHAPITRE III	
Tableau III.1. Passé cultural des situations étudiées	30
Tableau III.2. Rapports sables fins sur sables grossiers dans les horizons 50-70 et 100-120 cm	34
CHAPITRE IV	
Tableau IV.1. Systèmes de cultures et compacité des horizons supérieurs	38
Tableau IV.2. Porosité totale (%) calculée	41
CHAPITRE V	
Tableau V.1. Masse des racines tertiaires et quaternaires du Palmier à huile sur un profil de 210 cm sur le site 2 (Akpadanou)	48
Tableau V.2. Evolution dans le profil des racines tertiaires et quaternaires sur le site 2 (Akpadanou)	48
Tableau V.3. Stocks organiques dans une parcelle de palmiers à huile et de cultures vivrières (site 3)	55
CHAPITRE VI	
Tableau VI.1.a. Stocks organiques (kgC/m^2) dans les 35 et 70 cm superficiels du sol	61
Tableau VI.1.b. Stocks organiques (kgN/m^2) dans les 35 et 70 cm superficiels du sol	61
CHAPITRE VII	
Tableau VII.1. Estimation de l'azote potentiellement minéralisable dans l'horizon 0-15 cm	71
Tableau VII.2. Estimation de l'azote potentiellement minéralisable dans l'horizon 0-15 cm (sans le flush)	71

	Tableau VII.3. Azote total (N) et azote potentiellement minéralisable (No)	74
CHAPITRE VIII		
	Tableau VIII.1. Caractéristiques chimiques des échantillons de sol du site 2 sur lesquels ont été faits les test d'AZOTE ASSIMILABLE par le ray-grass	79
	Tableau VIII.2. Estimation de la biomasse totale récoltée	81
CHAPITRE IX		
	Tableau IX.1. Matrice de corrélations entre les caractéristiques relatives aux composés azotés	102
	Tableau IX.2. Indice de l'azote disponible (mgNkg^{-1} sol)	105
CHAPITRE X		
	Tableau X.1. Comparaison des bilans massiques des modes de fractionnement	110
	Tableau X.2. Comparaison des teneurs en carbone (%) en fonction du mode de fractionnement	110
	Tableau X.3. Teneurs et stocks de carbone dans les fractions granulométriques	112
	Tableau X.4. Teneurs et stocks d'azote dans les fractions granulométriques	113

CHAPITRE I

Figure I.1. Sols sur terres de barre dans le Sud du Bénin, isohyètes annuelles moyennes et localisation des sites	11
--	----

CHAPITRE III

Figure III.1. Coupe schématique des systèmes de cultures de la Province de l'Atlantique en direction Sud-Nord	29
--	----

CHAPITRE IV

Figure IV.1. Représentation schématique des sols sous forêt (F) et sous différents systèmes de culture	37
Figure IV.2. Profils de densité apparente sous forêt et sous différents systèmes de culture	40
Figure IV.3. Profils de pH sous forêt et sous différents systèmes de culture	44

CHAPITRE V

Figure V.1.a. Représentation schématique d'une parcelle de palmiers	50
Figure V.1.b. Représentation schématique de la maille élémentaire	50
Figure V.2. Profils des teneurs en carbone (%) sous-andains dans l'interligne et dans les "ronds" dans une parcelle de palmiers à huile (site3)	52
Figure V.3. Profils des teneurs en azote (mg/g sol) sous- andain dans l'interligne et dans les "ronds" dans une parcelle de palmiers à huile (site3)	52
Figure V.4. Profils des teneurs en carbone (%) sous billon et dans l'interbillon dans une parcelle de cultures vivrières (site3)	53
Figure V.5. Profils des teneurs en azote (mgN/g sol) sous billon et dans l'interbillon dans une parcelle de cultures vivrières (site3)	53

CHAPITRE VI

Figure VI.1a. Profils des teneurs en carbone (‰) sous forêt (F) et sous différents systèmes de culture	58
---	----

Figure VI.1b. Profils des teneurs en azote (‰) sous forêt (F) et sous différents systèmes de culture	59
Figure VI.2. Relations entre stocks d'éléments fins et stocks de carbone	63
CHAPITRE VII	
Figure VII.1. Azote potentiellement minéralisable (mg/N/kg/sol)	73
Figure VII.2. Teneurs en N initial, N flush et N potentiellement minéralisable	75
CHAPITRE VIII	
Figure VIII.1. Biomasse végétale totale de ray-grass récoltée (g de matière sèche) dans les sols prélevés sous forêt (F) et sous différents systèmes de cultures	83
Figure VIII.2. Quantité d'azote (mg/N) prélevée par la plante test	83
CHAPITRE IX	
Figure IX.1a. Profils des teneurs (mgN/kg) des fractions de l'azote organique obtenue par hydrolyse acide (site 1)	93
Figure IX.1b. Profils des teneurs (mgN/kg) des fractions de l'azote organique obtenue par hydrolyse acide (site 2)	94
Figure IX.1c. Profils des teneurs (mgN/kg) des fractions de l'azote organique obtenue par hydrolyse acide (site 3)	95
Figure IX.2. Teneurs en N (mg N.kg^{-1}) des fractions azotées obtenues par hydrolyse acide (site 1)	96
Figure IX.3. Relations entre la fraction hydrolysable distillable (NHD), la fraction hydrolysable non distillable (NHnD), la fraction non hydrolysable (NnH) et l'azote total	98
Figure IX.4. Profils des rapports NHnD/NHD sur les sites 1, 2 et 3	100
CHAPITRE X	
Figure X.1. Stocks de carbone (mgC/g sol) dans les fractions granulométriques des échantillons de sol prélevés sous forêt et sous palmeraie dans l'horizon 0-15 sur les sites 1 et 2	115

Figure X.2. Stocks d'azote (mgN/g sol) dans les fractions granulométriques des échantillons de sol prélevés sous forêt et sous palmeraie dans l'horizon 0-15 sur les sites 1 et 2

AVANT-PROPOS	1
INTRODUCTION GENERALE	4
PREMIERE PARTIE : INFLUENCE DES SYSTEMES DE CULTURES SUR L'EVOLUTION DES PROFILS CULTURAUX ET DES CARACTERES PHYSICO-CHIMIQUES DES SOLS	9
CHAPITRE I : Le milieu physique et humain dans le sud du Bénin	10
1. Le climat	10
2. La géomorphologie	12
3. La végétation	13
4. Les principaux sols dans le sud-Bénin	13
5. Le milieu humain et utilisation du sol	14
6. Conclusion	15
CHAPITRE II : Caractéristiques des sols étudiés	16
1. Généralités	16
2. Description morphologique et caractéristiques analytiques des sols sous forêt	18
2.1. Description morphologique	18
2.1.1. Site de Pobè (site 1)	18
2.1.2. Site d'Akpadanou (site 2)	19
2.1.3. Site de Ouidah (site 3)	20
2.1.4. Conclusion	21
2.2. Caractéristiques analytiques	22
2.3. Classification des sols sur terres de barre	26
3. Conclusion	26
CHAPITRE III : Description de la forêt et des systèmes de cultures	27
1. Présentation générale de la forêt et des systèmes de cultures étudiés	27
1.1. La forêt	27
1.2. Les plantations forestières	28
1.3. Les plantations de palmier à huile	28
1.4. Les cultures vivrières	32
2. Critères particuliers au choix des parcelles et répartition géographique	33
3. Conclusion	35

CHAPITRE IV : Modification des profils et des caractéristiques physico-chimiques des sols après cultures ou plantations forestières	36
1. Caractères morphologiques et physiques	3
1.1. Caractères morphologiques	36
1.1.1. Les sols cultivés sous palmeraie	36
1.1.2. Les sols sous cultures vivrières et sous plantations forestières	39
1.2. La densité apparente et la porosité totale	39
1.3. Relation entre la densité apparente, la teneur en éléments fins et la teneur en carbone	42
1.4. Conclusion	42
2. Caractères chimiques	43
3. Conclusion	45

DEUXIEME PARTIE : LES MATIERES ORGANIQUES ET L'AZOTE	
DANS LES PROFILS CULTURAUX - RELATION AVEC LA TEXTURE	46
CHAPITRE V : Hétérogénéité spatiale dans les parcelles de palmiers et de cultures vivrières : aspects méthodologiques	47
1. Effet des pratiques culturales sur la variabilité spatiale dans les parcelles de palmiers à huile et cultures vivrières	47
2. Plan d'échantillonnage	49
3. Méthodes d'analyse et de calcul	51
4. Résultats et discussions	51
4.1. Répartition des teneurs en carbone et en azote dans les parcelles de palmiers à huile et de cultures vivrières	51
4.2. Comparaison des stocks organiques sous palmiers et sous cultures vivrières	54
5. Conclusion	56
CHAPITRE VI : Répartitions du carbone et de l'azote dans les profils	
Relation avec le profil textural	57
1. Méthodologie	57
2. Résultats et discussions	57
2.1. Répartition du carbone et de l'azote dans les profils	57
2.2. Les stocks organiques	60
2.2.1. Evaluation des stocks organiques dans les profils étudiés	60

2.2.2. Relation entre profil textural et profil organique	62
3. Conclusion	64
TROISIEME PARTIE : LES SYSTEMES DE CULTURES ET	
L'EVOLUTION DES FORMES DE L'AZOTE	65
CHAPITRE VII : L'azote potentiellement minéralisable	66
1. Introduction	66
2. Matériels et méthodes	68
2.1. Les sols	68
2.2. Technique d'incubation	69
2.3. Méthodes d'analyse	70
2.4. Méthode d'ajustement	70
3. Résultats et discussions	70
3.1. Aspects méthodologiques	70
3.2. Effet des systèmes de culture sur l'azote potentiellement minéralisable	72
3.3. Le flux de minéralisation initiale	76
3.4. Relations entre l'azote potentiellement minéralisable, l'azote total et le flush de minéralisation	76
3.5. Conclusion	77
CHAPITRE VIII : Prélèvement de l'azote par une plante-test	78
1. Matériels et méthodes	78
1.1. Les sols	78
1.2. Traitements	78
1.3. Technique de culture	79
1.4. Les coupes	80
1.5. Dosage de l'azote	81
2. Résultats et discussions	81
2.1. Méthodologie	81
2.2. Effet du précédent cultural sur la production de biomasse végétale	82
2.3. Teneurs en azote du ray-grass récolté	82
2.4. Quantités d'azote prélevé par la plante test	84
2.5. Teneurs en potassium, calcium et magnésium dans la première coupe	85

2.6. Interaction entre la fertilisation minérale et l'assimilation de l'azote	85
3. Conclusions	86
CHAPITRE IX : Le fractionnement chimique de l'azote organique	87
1. Le fractionnement chimique de l'azote organique par la technique d'hydrolyse acide	87
1.1. Introduction	87
1.2. Milieux étudiés et techniques analytiques	88
1.2.1. Les sols	88
1.2.2. Détermination des principales fractions d'azote du sol	89
1.3. Résultats et discussions	90
1.3.1. Bilans et précisions des dosages	90
1.3.2. Distribution des formes d'azote dans le profil	91
1.3.2.1. Variations quantitatives	91
1.3.2.1.1. Données générales	91
1.3.2.1.2. Variations quantitatives des fractions azotées dans les profils	92
1.3.2.1.3. Variation quantitative des fractions azotées en fonction des systèmes de cultures	92
1.3.2.2. Variations qualitatives des fractions azotées	97
1.3.2.3. Variations du rapport $\text{NH}_4\text{D}/\text{NHD}$	99
1.4. Conclusion	101
2. Test d'évaluation de l'azote potentiellement disponible	103
2.1. Introduction	103
2.2. Résultats	103
2.3. Conclusions	104
CHAPITRE X : Le fractionnement granulométrique de la matière organique	106
1. Introduction	106
2. Matériels et méthodes	108
2.1. Choix de la méthode de fractionnement	108
2.2. Les sols	111
3. Résultats et discussions	111
3.1. Bilans en masse, carbone et azote	111
3.2. Caractéristiques des fractions	111
3.2.1. Caractéristiques morphologiques des fractions	111

3.2.2. Composition chimique des fractions	114
3.3. Distribution du carbone et de l'azote dans les fractions : effet de la mise en culture	117
CONCLUSION	120
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	128
ANNEXES	143
LISTE DES ANNEXES	174
LISTE DES TABLEAUX	178
LISTE DES FIGURES	181
TABLE DES MATIERES	185



BP 3
34981 St GELY du FESC Cedex
Tél. 67 84 86 20

INTRODUCTION

PREMIERE PARTIE

INFLUENCE DES SYSTEMES DE CULTURES SUR L'EVOLUTION DES PROFILS CULTURAUX ET DES CARACTERES PHYSICO - CHIMIQUES DES SOLS

L'objet de cette première partie est de décrire le dispositif expérimental qui a servi de base pour notre étude. Il comprend quatre chapitres :

- le premier chapitre étudie le milieu physique et humain dans le Sud-Bénin.
- le second chapitre décrit les sols étudiés (caractères morphologiques, micromorphologiques et physico-chimiques). Il met en évidence en particulier les différences sur le plan textural.
- le troisième chapitre présente les systèmes de cultures dominants sur les plateaux de terres de barre.
- le quatrième chapitre enfin compare les profils (caractères morphologiques et physico-chimiques) sous végétation naturelle forestière et sous cultures sur les trois sites.

DEUXIEME PARTIE

LES MATIERES ORGANIQUES ET L'AZOTE DANS LES PROFILS CULTURAUX. RELATION AVEC LA TEXTURE.

Dans cette deuxième partie, il s'agit d'évaluer et de comparer les stocks organiques des sols des différentes parcelles. Elle comprend deux chapitres :

- le premier est consacré à l'étude de l'effet des pratiques culturales sur la variabilité intraparcellaire (chapitre V)
- le second vise à comparer les teneurs en matière organique et les stocks organiques sous végétation naturelle forestière et sous cultures. On étudie les relations entre le profil organique et le profil textural dans ces sols dont les horizons de surface sont peu riches en éléments fins (Chapitre VI).

TROISIEME PARTIE

LES SYSTEMES DE CULTURES ET L'EVOLUTION DES FORMES DE L'AZOTE

Dans cette partie, nous évaluerons l'incidence des systèmes de cultures sur l'azote potentiellement minéralisable (chapitre VII) ou prélevé par une plante (ray-grass) en serre (chapitre VIII). Nous indiquerons par le fractionnement chimique (chapitre IX) et le fractionnement granulométrique de la matière organique (Chapitree X) les fractions chimiques ou physiques impliquées dans ces variations.

CONCLUSION

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANNEXES

LISTE DES ANNEXES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES FIGURES

TABLE DES MATIERES

RESUME

DJEGUI Narcisse

Thèse présentée pour obtenir le titre de Docteur de l'Institut National Polytechnique de Toulouse (Spécialité : Sciences Agronomiques) (30.06.92)

"Matière Organique et Azote dans les sols cultivés sur terres de barre (Bénin)"

L'influence de différents systèmes de culture sur le statut organique des sols ferrallitiques sablo-faiblement argileux du Sud-Bénin (terres de barre) a été étudiée en comparant les stocks de matière organique dans les sols sous forêt (F), sous plantations forestières (PF), sous plantations de palmiers à huile (PH) et sous cultures vivrières (CV).

Au niveau intra-parcellaire, il est mis en évidence une forte variabilité des stocks organiques en fonction des techniques culturales utilisées. Au niveau inter-parcellaire, on observe une forte diminution (50-70 %) des stocks organiques après cultures. La hiérarchie des traitements sur les trois sites est la suivante : $F > PF > CV > PH$. Cette diminution est d'autant plus importante que les horizons supérieurs sont plus sableux.

Cette baisse importante de la matière organique (C et N) se traduit par une diminution importante des formes de l'azote les plus labiles. Les teneurs de l'azote potentiellement minéralisable (N_o) et les quantités d'azote prélevées par une plante-test (le ray-grass) sont beaucoup plus faibles sous cultures que sous forêt. Le rapport N_o/N_{total} décroît en général dans les agrosystèmes, ce qui montre que les fractions de l'azote labile des horizons humifères de ces sols décroissent proportionnellement plus que l'azote total.

Les formes de matière organique impliquées dans ces variations ont été étudiées par différentes approches : hydrolyses acide et alcaline, fractionnement granulométrique de la matière organique.

Les fractions obtenues par hydrolyse acide décroissent toutes, y compris la fraction non hydrolysable sous l'action des cultures et sont toutes corrélées à l'azote total. L'"azote potentiellement disponible" évalué par hydrolyse alcaline diminue très fortement dans l'horizon de surface en fonction des systèmes de culture. Les quantités d'azote ainsi obtenues sont corrélées à l'azote total et aux teneurs des différentes fractions azotées obtenues par hydrolyse acide.

Le fractionnement granulométrique montre que c'est principalement les matières organiques contenues dans les fractions supérieures à 50 μm et secondairement celles des fractions 2-50 μm des sols sous cultures qui ont diminué. Par contre, les matières organiques contenues dans la fraction argileuse ont peu varié. Ces dernières paraissent relativement stables, mais leur contribution au stock d'azote total de C et N de ces sols est faible (30 %).

La réhabilitation de la fertilité azotée de ces sols passe obligatoirement par la reconstitution de leur stock organique. Les plantations forestières paraissent aptes à remonter substantiellement le stock organique de ces sols sableux.